



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

TIINA KOIVUNEN
TUULIPUISTON SÄHKÖVERKON SUOJAUS

Diplomityö

Tarkastaja: Professori Pertti Järventausta
Tarkastaja ja aihe hyväksytty Tieto- ja
sähkötekniikan tiedekuntaneuvoston kokouk-
sessa 3. marraskuuta 2010

TIIVISTELMÄ

TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

Sähkötekniikan koulutusohjelma

KOIVUNEN, TIINA: Tuulipuiston sähköverkon suojaus

Diplomityö, 45 sivua

Helmikuu 2011

Pääaine: Sähköverkot ja -markkinat

Tarkastaja: Professori Pertti Järventausta

Avainsanat: tuulipuisto, sähköverkko, suojaus

Työssä tarkastellaan tuulipuiston sähköverkon suojausta. Aihe on ajankohtainen tuulivoiman nopean lisääntymisen vuoksi. Tutkimusta varten hankittiin taustatietoa sähköverkon vioista, vikavirtalaskennasta sekä suojaruleista. Myös tuulipuiston eri komponentit ja niiden vikatilanteiden aikainen käyttäytyminen vaikuttavat suojauksen kokonaisratkaisuun.

Työssä tehtiin suojaussuunnitelma Empower Oy:n suunnittelemaalle 40 MVA:n tuulipuistolle. Tarkasteltavassa tuulipuistossa on 20 kappaletta 2 MVA:n tuulivoimaloita. Tuulivoimaloiden tyyppiä valittiin täystehotajuusmuuttajakäyttöiset tuulivoimalat niiden vian aikaisen käyttäytymisen johdosta. Maadoitustavaksi puiston keskijänniteverkkoon valittiin maasta erotettu verkko. Suojauksratkaisussa päädyttiin perinteisen keskijänniteverkon suojausperiaatteisiin. Käyttöön otettiin kaksiportainen ylivirtasuojaus, suunnattu maasulkusuojaus ja varalle nollavirtasuojaus. Releiden asettelut määrättiin kaksi- ja kolmivaiheisten oikosulkuvirtojen sekä yksivaiheisten maasulkuvirtojen ja generaattoreiden syöttämien virtojen perusteella. 110 kV:n verkon asetteluissa otettiin huomioon alueverkon syöttöpisteiden oikosulkutehot, releasettelut ja lisäksi Fingrid Oyj:lta saadut releasetteluiden ohjeet.

Mahdollisten lisäsuojien tarvetta, kuten johdinkatkos- ja katkeilevan maasulun suojat, olisi hyvä tutkia lisää. Myös suunnattujen ylivirtasuojien käyttöä pitäisi harkita, sillä niillä pystytään estämään turhat laukaisut viereisten generaattorilähtöjen vikatilanteissa. Lisäksi laskelmissa käytetyn NEPLAN-verkostolaskentaohjelman tuulipuistomodulin toimintaperiaatetta pitäisi tarkastella lisää.

ABSTRACT

TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Master's Degree Programme in Electrical Engineering

KOIVUNEN, TIINA: Relay protection of wind park power systems

Master of Science Thesis, 45 pages

February 2011

Major: Power systems and markets

Examiner: Professor Pertti Järventausta

Keywords: wind park, power system, protection of power system

Because of increasing wind power this research about wind park power system protection has been conducted. Power system faults, fault current calculation and the principles of relay protection have been studied. Also the different components of a wind park and their operating principles affect the protection of the wind park's power system.

In this M. Sc. Thesis, a protection scheme for a 40 MVA wind park has been designed. The wind park has 20 2 MVA wind turbines. These wind turbines were chosen to be full power converter connected wind turbines because of their simple behaviour during faults. Neutral isolated system was chosen as the medium voltage network type. The power system of a wind park resembles a traditional one so much that the protection system was chosen to be like in a traditional medium voltage power system. The set values of relays were determined by simulated 2- and 3-phase short circuit currents, 1-phase earth fault currents and feeding currents of wind park. The set values of the high voltage grid were determined by set values of the regional grid and the base values received from Fingrid Oyj.

The need for additional relays could be researched more thoroughly, especially broken conductor detection relay and intermittent earth fault relay. With directional overcurrent relays unnecessary tripping can be prevented when a fault appears on the neighbouring line. Also the wind park module used in the power system simulation software NEPLAN need more research.

ALKUSANAT

Tämä työ on tehty Empower Oy:n tilauksesta Tampereen teknillisen yliopiston Sähköenergiatekniikan laitokselle. Työn tarkastajana toimi yliopistolta professori Pertti Järventausta ja ohjaajana Empower Oy:ltä DI Petri Koski. Haluan kiittää Perttiä tarkastuksesta sekä hyvistä neuvoista ja kommentteista työn kirjoituksen aikana ja Petriä erittäin hyvästä ohjauksesta ja suuresta kiinnostuksesta aiheeseeni.

Lisäksi haluan kiittää Ari Jaakolaa ja Paavo Päckilää WinWinD Oy:ltä kaikesta siitä tiedosta, jotka olen heiltä saanut koskien WinWinD Oy:n tuuliturbiineja. Haluan kiittää myös Raine Laaksosta PVO:lta ja Pentti Liitiä Kemin Energialta loistavista järjestelyistä Ajoksen tuulipuistoon Kemiin. Haluan kiittää vielä Lauri Koivistoa Fingrid Oyj:ltä 110 kV verkon releasettelutiedoista sekä ystävääni Hanna-Mari Pekkala Vattenfall Verkko Oy:ltä yleisesti releisiin liittyvistä tiedoista.

Viimeisenä haluan kiittää vanhempiani tukemisesta koko opiskelujen ajan sekä Mikkoa ja Jamia, jotka ovat pitäneet minun jalkani maassa ja ajatukseni raitellaan koko diplomityön kirjoittamisen aikana.

Helsingissä 16.1.2011

Tiina Koivunen

SISÄLLYS

1. Johdanto	1
2. Sähköverkon viat ja suojaus	4
2.1 Sähköverkon viat	4
2.2 Symmetriset komponentit	6
2.3 Vikavirtalaskenta	7
2.4 Suojareleet	10
2.4.1 Jännitereleet	10
2.4.2 Taajuusreet	11
2.4.3 Virtareleet	11
2.4.4 Suunta- ja tehoreleet	12
2.4.5 Epäsymmetriareleet	13
2.4.6 Differentiaalireleet	13
2.4.7 Distanssireleet	14
2.4.8 Muut suojalaitteet	15
3. Tuulipuiston sähköverkon komponentit	17
3.1 Generaattori ja mahdollinen taajuudenmuuttaja	17
3.2 RMU-kojeisto	21
3.3 Tuulipuiston sisäinen keskijänniteverkko puiston sähköaseman kent- tään asti	22
3.4 Tuulipuiston sähköaseman tehomuuntajat	23
3.5 110, 220 tai 400 kV:n liityntäjohto	24
3.6 Muut mahdolliset komponentit	24
4. Verkkoyhtiöiden vaatimukset verkkoonliitynnälle	26
4.1 Yleiset liittymisehdot	26
4.2 Voimalaitosten järjestelmätekniset vaatimukset	28
5. Tuulivoimalatyypin vaikutus tuulipuiston sähköverkon ja tuulivoi- maloiden suojaukseen	31
6. Case-kohteen suojauksen suunnittelu	35
6.1 NEPLAN-verkostolaskentaohjelma	35
6.2 Case-kohteen suojauksen suunnittelu	37
7. Yhteenveto ja kehitysehdotukset	43
7.1 Yhteenveto	43

7.2 Kehitysehdotukset	45
Lähteet	46

KÄYTETYT MERKINNÄT

Lyhenteet

ENTSO-E	European Network of Transmission System Operators for Electricity, Euroopan kantaverkkoyhtiöiden yhteistyöjärjestö
FRT	Fault ride trough, Verkkovian sieto
PMSG	Permanent magnet synchronous generator, Kestomagneettitahtigeneraattori
pu	Per unit, Suhteellisarvo
RMU	Ring main unit, Rengassyöttökojeisto
SCADA	Supervisory Control And Data Acquisition, Käytönvalvontajärjestelmä
SCIG	Squirrel cage induction generator, Häkkikäämitty oikosulkugeneraattori
STATCOM	Static synchronous compensator, Staattinen synkronikompenzaattori
SVC	Static var compensator, Staattinen loistehon kompenzaattori
TCR	Thyristor controlled reactor, Tyristoriohjattu reaktori
WRIG	Wound rotor induction generator, Liukurengasepätahtigeneraattori
WRSG	Wound rotor synchronous generator, Liukurengastahtigeneraattori

Symbolit

A	Pinta-ala
c	Jännitekerroin
C	Johtimien maakapasitanssi
$\cos \phi$	Tehokerroin
E	Vikapaikan Théveninin jännite
f	Taajuus
\underline{I}_0	Nollavirta
\underline{I}_k	Jatkuvan tilan oikosulkuvirta
\underline{I}_{k1}	Yksivaiheinen oikosulkuvirta
\underline{I}_{k2}	Kaksivaiheinen oikosulkuvirta
\underline{I}_{k3}	Kolmivaiheinen oikosulkuvirta

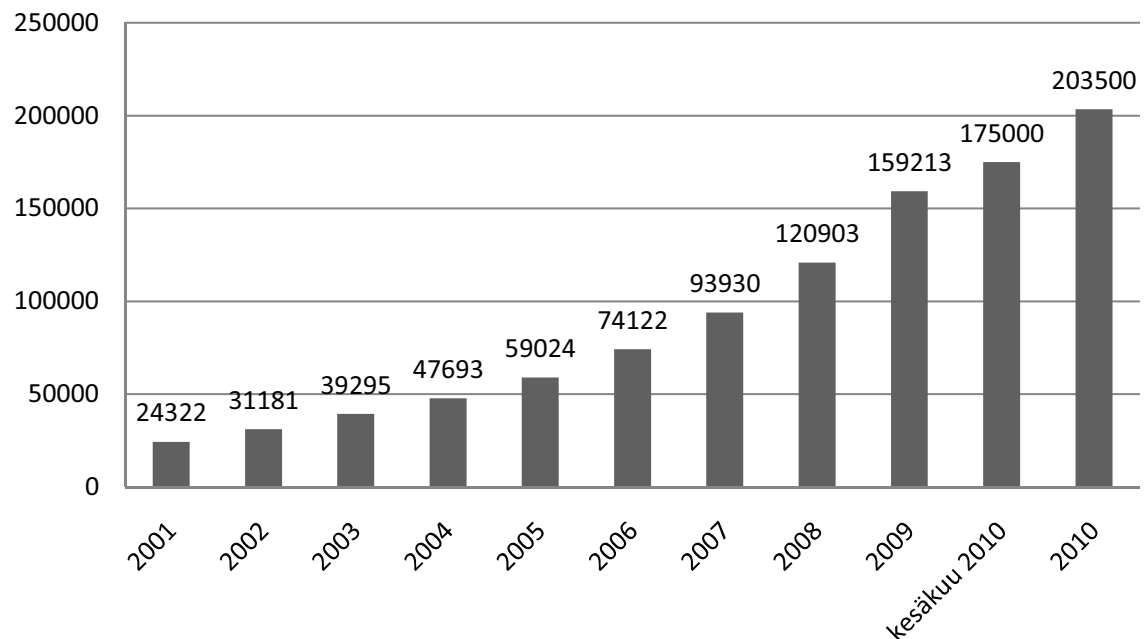
$I_{pZeroMvWecPu}$	WWD3:n resistiivinen virran nollakomponentti
$I_{pPosMvWecPu}$	WWD3:n resistiivisen virran myötäkomponentti
$I_{pNegMvWecPu}$	WWD3:n resistiivisen virran vastakomponentti
i_s	Sysäysoikosulkuvirta
$\underline{I}_{syöttö}$	Syöttövirta
$I_{rZeroMvWecPu}$	WWD3:n reaktiivinen virran nollakomponentti
$I_{rposMvWecPu}$	WWD3:n reaktiivisen virran myötäkomponentti
$I_{rnegMvWecPu}$	WWD3:n reaktiivisen virran vastakomponentti
j	Imaginääriyksikkö, $1\angle -90^\circ$
P	Pätöteho
P_{max}	Maksimipätöteho
$P_{posMvWecPu}$	WWD3:n pätöteho
P_{tuuli}	Tuulesta saatava teho
Q	Loisteho
$Q_{posMvWecPu}$	WWD3:n loisteho
ρ	Tiheys
R_f	Vikaresistanssi
\underline{U}	Pääjännite
$U_{posMvWecPu}$	WWD3:n testiverkon jännite
\underline{U}_0	Nollajännite
\underline{U}_a	Vaiheen a jännite
\underline{U}_b	Vaiheen b jännite
\underline{U}_c	Vaiheen c jännite
\underline{U}_v	Vaihejännite
V	Nopeus
\underline{Z}_0	Nollaverkon oikosulkuimpedanssi
\underline{Z}_1	Myötäverkon oikosulkuimpedanssi
\underline{Z}_2	Vastaverkon oikosulkuimpedanssi
\underline{Z}_f	Vikapaikan oikosulkuimpedanssi
ω	kulmanopeus, $2\pi f$

Termit

cut-in -nopeus	Tuulivoimalan käynnistysnopeus
cut-off -nopeus	Tuulivoimalan sammutusnopeus
PQ-diagrammi	Pätö- ja loistehodiagrammi
WWD3	WinWinD Oy:n 3 MW:n tuuliturbiinimalli

1. JOHDANTO

Tuulivoima on nykyään hyvin suosittu uusiutuva energiamuoto, ja sen määrää kasvatetaan ympäri maailman. Vuoden 2009 loppuun mennessä tuulivoimakapasiteettia oli asennettu lähes 160 GW ja näiden tuottama vuotuinen energiamäärä on 340 TWh. Tämä määrä on jo 2 %:a koko maailman sähköntuotannosta. Vuodesta 2008 vuoteen 2009 tuulivoiman määrä on kasvanut 31,7 %:a. Kuvassa 1.1. on esitelty maailman tuulivoiman kasvu vuodesta 2001 kesäkuuhun 2010. Koko vuoden 2010 määrä on ennustettu. (WWEA 2010)



Kuva 1.1. Maailman tuulivoimakapasiteetti [MW] vuodesta 2001 vuoden 2010 kesäkuuhun sekä ennuste vuodelle 2010 (WWEA 2010).

Tuuli syntyy ilmamassojen lämpötilaeroista. Sen nopeus muuttuu ajan ja paikan mukaan, ja myös maaston muodot vaikuttavat sen nopeuteen. Kiinteänopeuksiset tuulivoimalat eivät juuri voi hyödyntää tuulen nopeuden nopeita muutoksia, mutta muuttuvanopeuksiset tuulivoimalat pystyvät hyödyntämään muutokset. Tuulesta saatava teho voidaan laskea kaavalla (Ackermann 2005)

$$P_{tuuli} = \frac{1}{2} \rho A V^3, \quad (1.1)$$

missä ρ on ilman tiheys, A on roottorin pinta-ala ja V on tuulen nopeus. Kuten kaavasta (1.1) huomataan, tuulesta saatava teho on verrannollinen tuulen nopeuden kolmanteen potenssiin. Tästä johtuen tuotetun tehon määrä muuttuu nopeasti tuulen nopeuden muuttuessa. (Ackermann 2005)

Tuulivoimala käynnistyy, kun tuulen nopeus on luokkaa 3 m/s. Tätä kutsutaan cut-in -nopeudeksi eli käynnistysnopeudeksi. Tuulivoimalan nimellisteho saavutetaan 12–16 m/s nopeusalueella. Kun tuulen nopeus nousee 20–25 m/s -alueelle, joudutaan tuulivoimala pysäyttämään, jotta tuulivoimala tai sen komponentit eivät rikkoutuisi. Tätä taas kutsutaan cut-off -nopeudeksi eli sammutusnopeudeksi. (Ackermann 2005)

Kun tuulen nopeus liikkuu cut-in tai cut-off -tuulen nopeusalueilla tuulivoimalat käynnistyvät ja sammuvat vuoronperään. Tämä horjuttaa sähköverkon tasapainoa, ja siksi se pitäisi saada minimoitua. Tähän auttaa muun muassa voimaloiden yhdistäminen tuulipuistoiksi. Tuulipuistoissa yhteen tuulivoimalaan kohdistuvat tuulenmuutokset eivät vaikuta koko tuulipuiston sähköntuotantoon niin paljon kuin yksittäisen tuulivoimalan tapauksessa. Lisäksi maantieteelliset erot eivät ole puistossa niin suuria kuin yksittäisten voimaloiden tapauksessa. Näin tuulipuiston tuottaman sähkön laatu on huomattavasti parempaa kuin yksittäisen tuulivoimalan sähkön laatu. (Ackermann 2005)

Tässä työssä on tavoitteena tutkia tuulipuiston sähköverkon suojausta. Tämän pohjalta laaditaan toimintamalli Empower Oy:lle tuulipuistojen suojaussuunnittelusta ja näin parannetaan yrityksen valmiuksia tuulipuistojen suunnitteluun. Tähän mennessä Suomessa ei ole juurikaan tuulipuistoja rakennettu, mutta suunnitelmia niiden rakentamisesta on kuitenkin paljon. Tämän vuoksi kokemuseräistä tietoa tuulipuistojen sähköverkon suojauksesta ei ole vielä paljon saatavilla Suomesta.

Tässä työssä käydään ensin läpi yleisesti sähköverkon erilaiset vikatilanteet ja vikavirtalaskenta. Samassa luvussa käsitellään myös erilaiset suojareletyypit, niiden toimintaperiaatteet ja käyttökohteet. Näiden jälkeen käsitellään tuulipuiston komponentit yksitellen sekä niiden suojausmenetelmät. Lisäksi samalla tarkastellaan hie-man tuulipuiston keskijänniteverkon ja perinteisen keskijänniteverkon eroja.

Luvussa 4 käsitellään verkkoyhtiöiden vaatimukset verkkoonliittymälle, jotka keskittyvät lähinnä kantaverkon vaatimuksiin, sillä tuulipuistot liitetään usein 110 kV:n verkkoon suurten tehojensa vuoksi. Myös alueverkkoyhtiöt käyttävät usein verkkoonliittymäehtoinaan valtakunnallisia vaatimuksia. Verkkoonliittymävaatimusten jälkeen tutkitaan syvällisemmin eri tuulivoimalatyyprien vaikutusta suojaukseen; miten erityyppiset tuulivoimalat reagoivat häiriötilanteissa ja miten ne vaikuttavat sähkön laatuun. Esimerkkinä on käytetty Kemin Ajoksen tuulipuistosta saatuja mitaustietoja. Lopuksi tarkastellaan Empower Oy:n suojaussuunnittelua tällä hetkellä. Tämä toteutetaan pienen suunnitteluprojektin avulla, jossa suunnitellaan suojaus

kokonaisteholtaan 40 MVA:n puistolle. Tarkasteltava tuulipuisto on toteutettu 20 kappaleella 2 MVA:n tuulivoimaloita. Suunnitteluprojektin avulla arvioidaan Empower Oy:n verkostolaskentatyökaluja ja pohditaan tuulipuiston suojaussuunnittelun todenmukaisuutta ja annetaan sille kehitysideoita.

2. SÄHKÖVERKON VIAT JA SUOJAUS

Sähköverkoissa esiintyy erilaisia vikatapauksia. Vikojen syntymistä koetetaan estää ja niiden esiintyessä pyritään kestoajat minimoimaan suojareleiden ja katkaisijoiden avulla. Seuraavassa esitellään verkon vikatapauksia, vikavirtalaskentaa ja suojareleitä.

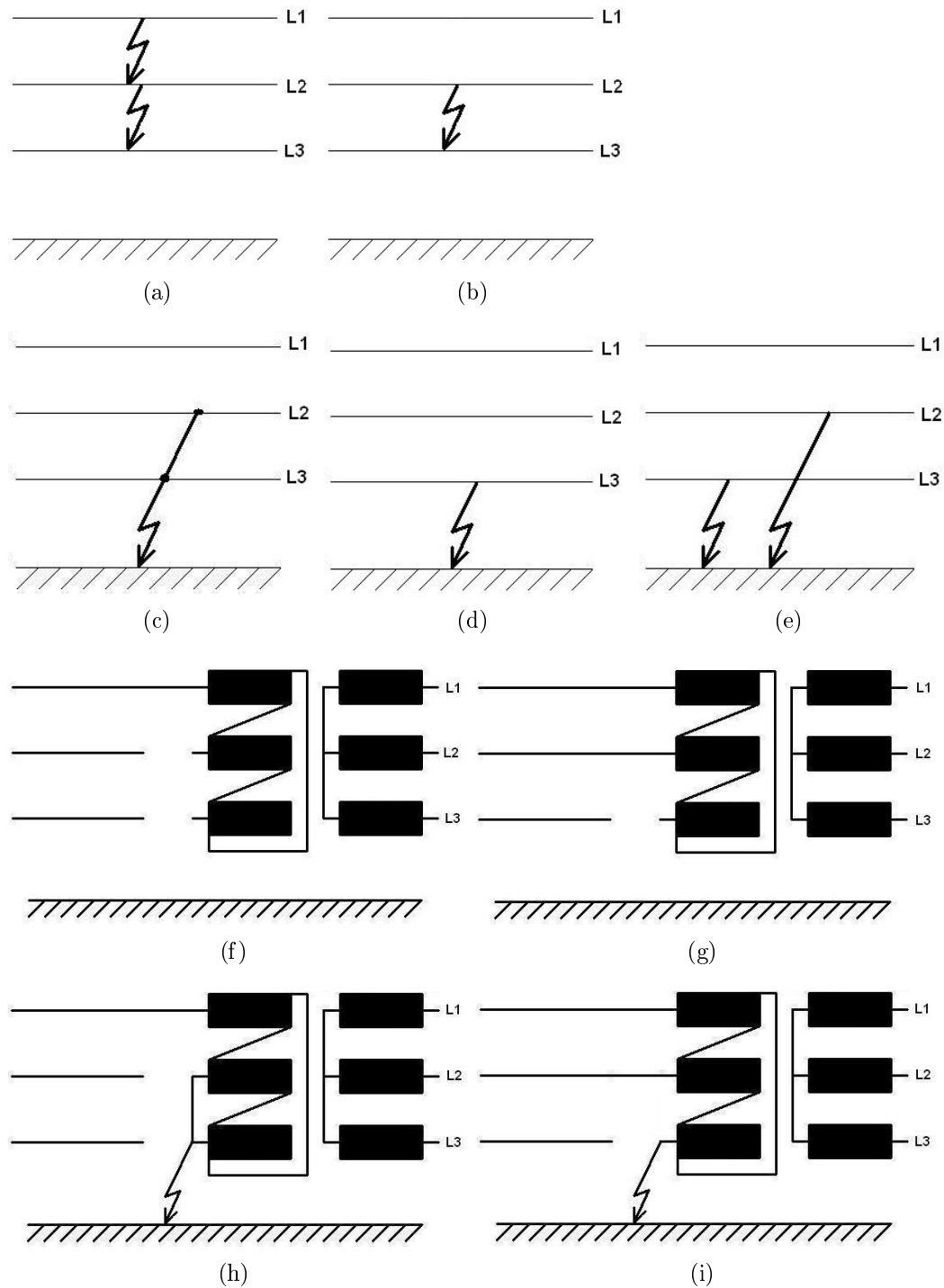
2.1 Sähköverkon viat

Sähköverkoissa esiintyy vikatapauksia, kuten oiko- ja maasulkuja sekä maasulullisia ja maasuluttomia johdinkatkeamia. Kolmivaiheiset oikosulut ovat symmetrisiä vikoja ja kaikki muut tapaukset ovat epäsymmetrisiä. Symmetrisessä viassa kaikkien vaiheiden jännitteet ja virrat ovat yhtä suuret. Epäsymmetrisessä viassa vaiheiden virrat ja jännitteet eivät käyttäydy symmetrisesti.

Oikosulkuja on kaksi- ja kolmivaiheisia ja ne ovat aina vaiheiden välisiä. Oikosuluksi kutsutaan sitä, kun verkon virtapiiri sulkeutuu vikaimpedanssin tai valokaaren kautta. Näin voi käydä eristysvian tai muun ulkoisen kosketuksen seurauksena. Kuvassa 2.1. on esitetty eri vikatyyppejä (Loukkalahti 2008).

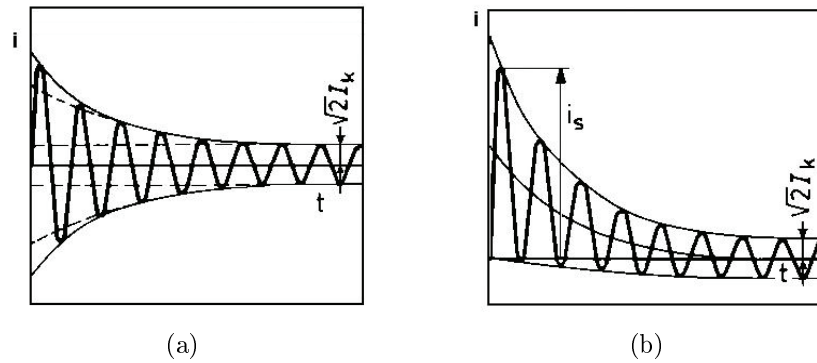
Maasulkuja on yksi- ja kaksivaiheisia ja lisäksi kaksoismaasulkuja, jolloin verkossa on maasulku kahdessa eri pisteessä. Maasulullisissa johdinkatkeamissa johdin katkeaa ja jännitteinen pää ylettyy maahan asti aiheuttaen maakosketuksen. Maasuluttomissa johdinkatkeamissa johdin katkeaa, mutta ei osu maahan. Johdinkatkeamia voi olla yksi-, kaksi- ja kolmivaiheisia. Johdinkatkeamat ovat harvinaisia kaapeleilla ja aiheutuvat lähinnä kaivinkoneiden kaivutöistä. Kaapeleissa voi ilmetä kuitenkin katkeileva maasulku, jossa useimmiten kaapeliin tulee eristysvika ja näin ollen kaapelin johtimet pääsevät kosketuksiin toistensa kanssa tai johdin pääsee kosketuksiin maan kanssa. Eristyksen pettäessä kaapelin johtimiin pääsee vettä ja syntyy läpilyönti, joka aiheuttaa maasulun. Maasulku poistuu veden haihtuessa läpilyönnin aiheuttaman lämmön johdosta. Maasulku syntyy jälleen, kun kaapeliin kertyy vettä ja näin maasulku syntyy ja poistuu.

Oikosulkuvirta jaetaan kolmeen osaan: alku-, muutos- ja jatkuva tila. Heti vian jälkeen alkutilassa oikosulkuvirta on suurimmillaan ja samalla verkon impedanssi on pienimmillään. Alkutilassa ilmenevää oikosulkuvirran suurinta hetkellisarvoa kutsutaan sysäysoikosulkuvirraksi i_s , ja se esiintyy ensimmäisen puolijakson kuluttua vian ilmenemisestä. Muutostilassa oikosulkuvirta on vielä huomattavasti suurempi kuin



Kuva 2.1. Oiko- ja maasulkuviat sekä johdinkatkeamaviat: (a) kolmivaiheinen oikosulku, (b) kaksivaiheinen oikosulku, (c) kaksivaiheinen maasulku, (d) yksivaiheinen maasulku, (e) kaksoismaasulku, (f) kaksivaiheinen johdinkatkeama, (g) yksivaiheinen johdinkatkeama, (h) kaksivaiheinen johdinkatkeama ja maasulku kuorman puolella sekä (i) yksivaiheinen johdinkatkeama ja maasulku kuorman puolella (Loukkalahti 2008).

nimellisvirta; siksi suojaus pyritään tekemään muutostilan aikana. Jatkuvan tilan oikosulkuvirta I_k , ilmenee hyvin harvoin, sillä suojauksen pitäisi toimia ennen jatkuvaan tilaan siirtymistä. Kuvassa 2.2. on esitetty symmetrisen ja epäsymmetrisen oikosulkuvirran periaatteellinen kulku. Kuvan epäsymmetrinen oikosulkuvirta on syntynyt, kun symmetrisessä oikosulkuviassa vikavirtaan on muodostunut tasakomponentti, ja se on tehnyt virrasta epäsymmetrisen.



Kuva 2.2. (a) Symmetrinen oikosulkuvirta. (b) Epäsymmetrinen oikosulkuvirta. (Nousiainen 2010)

2.2 Symmetriset komponentit

Epäsymmetristen vikatilanteiden laskenta on hankalaa ja siksi on kehitetty laskentamalli symmetristen komponenttien avulla. Näin verkon vaihekohtaiset komponentit voidaan jakaa kolmeen osakomponenttiin: myötä-, vasta- ja nollakomponenttiin. Todellinen arvo saadaan laskettua näiden osakomponenttien summasta.

Myötäjärjestelmässä vallitsee normaali vaihejärjestys a-b-c. Kun vaihe-eroa merkitään $\underline{\alpha} = 1 \angle 120^\circ$, merkitään myötäjärjestelmän jännitteet

$$\begin{aligned} \underline{U}_{a1} &= \underline{U}_1 \\ \underline{U}_{b1} &= \underline{\alpha}^2 \underline{U}_1 \\ \underline{U}_{c1} &= \underline{\alpha} \underline{U}_1 \end{aligned} \quad (2.1)$$

Vastajärjestelmässä vaihejärjestys on vastakkainen myötäjärjestelmään nähden eli a-c-b ja näin jännitteet merkitään

$$\begin{aligned} \underline{U}_{a2} &= \underline{U}_2 \\ \underline{U}_{b2} &= \underline{\alpha} \underline{U}_2 \\ \underline{U}_{c2} &= \underline{\alpha}^2 \underline{U}_2 \end{aligned} \quad (2.2)$$

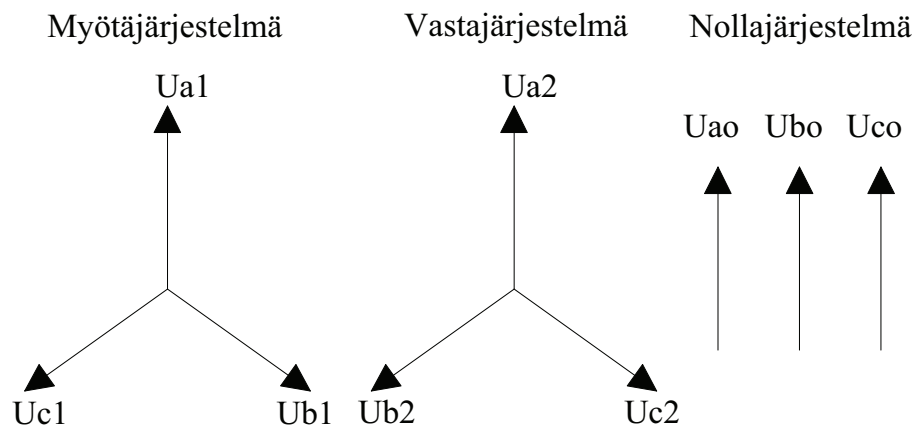
Nollajärjestelmässä komponentit ovat samanvaiheisia ja samansuuruisia. Nollajärjestelmän jännitteet ovat

$$\begin{aligned}\underline{U}_{a0} &= \underline{U}_0 \\ \underline{U}_{b0} &= \underline{U}_0 \\ \underline{U}_{c0} &= \underline{U}_0\end{aligned}\tag{2.3}$$

Todelliset vaihejännitteiden arvot saadaan siis laskemalla myötä-, vasta- ja nolla-komponenttien arvot yhteen

$$\begin{aligned}\underline{U}_a &= \underline{U}_{a0} + \underline{U}_{a1} + \underline{U}_{a2} \\ \underline{U}_b &= \underline{U}_{b0} + \underline{U}_{b1} + \underline{U}_{b2} \\ \underline{U}_c &= \underline{U}_{c0} + \underline{U}_{c1} + \underline{U}_{c2}\end{aligned}\tag{2.4}$$

Kuvassa 2.3. on esitetty symmetriset komponentit vektorimuodossa. (Nousiainen 2010)



Kuva 2.3. Symmetriset komponentit: myötä-, vasta- ja nollajärjestelmä (Nousiainen 2010).

2.3 Vikavirtalaskenta

Oikosulkuvirta voidaan laskea Théveninin menetelmän yksivaiheisella sijaiskytkennällä. Siinä komponentit ja lähteet korvataan oikosulkuimpedansseilla ja vikapaikkaan sijoitetaan Théveninin ekvivalenttinen jännitelähde cU , jossa c on taulukon 2.1. mukainen kerroin ja U verkon pääjännite juuri ennen vikaa. Oikosulkuvirta voidaan laskea kaavalla

$$\underline{I}_k = \frac{c\underline{U}}{\sqrt{3}\underline{Z}_f},\tag{2.5}$$

jossa c on taulukon 2.1. mukainen jännitekerroin, \underline{U} on verkon pääjännite, ja \underline{Z}_f vikapaikan oikosulkuimpedanssi. Näin kaavalla saadaan laskettua sekä maksimi- että minimioikosulkuvirrat.

Taulukko 2.1. IEC 60909- mukainen jännitekerroin c (ABB 2003).

Nimellisjännite \underline{U}_n	Maksimioiko- sulkuvirta c_{max}	Minimioiko- sulkuvirta c_{min}
pienjännite 100 - 1000 V		
a) 230 V / 400 V	1.00	0.95
b) muut jännitteet	1.05	1.00
keskijännite 1 kV - 35 kV	1.10	1.00
suurjännite 35 kV - 230 kV	1.10	1.00

Edellisen alaluvun perusteella saadaan kolmivaiheiseksi oikosulkuvirraksi

$$\underline{I}_{k3} = \frac{\underline{U}_v}{\underline{Z}_1 + \underline{Z}_f}, \quad (2.6)$$

jossa \underline{U}_v on verkon vaihejännite ennen vikaa ja \underline{Z}_1 myötäverkon oikosulkuimpedanssi. Koska kolmivaiheinen oikosulku on symmetrinen, tarvitsee ottaa huomioon vain myötäverkon impedanssi. Kaksivaiheisessa oikosulussa pitää ottaa huomioon sekä myötä- että vastaimpedanssit. Kaksivaiheisen oikosulun, jossa ei ole maakosketusta, oikosulkuvirraksi saadaan

$$\underline{I}_{k2} = \frac{\underline{U}_v}{\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2 + \underline{Z}_f}, \quad (2.7)$$

jossa \underline{Z}_2 vastaverkon oikosulkuimpedanssi. Kaksivaiheisessa maaoskosulussa pitää ottaa huomioon lisäksi nollaverkon komponentti ja siten oikosulkuvirta saadaan kaavasta

$$\underline{I}_{k2} = \frac{\underline{U}_v}{\underline{Z}_1 + \frac{\underline{Z}_2(\underline{Z}_0 + 3\underline{Z}_f)}{\underline{Z}_2 + \underline{Z}_0 + 3\underline{Z}_f}}, \quad (2.8)$$

jossa \underline{Z}_0 nollaverkon oikosulkuimpedanssi. Yksivaiheisessa maasulussa oikosulkuvirta saadaan

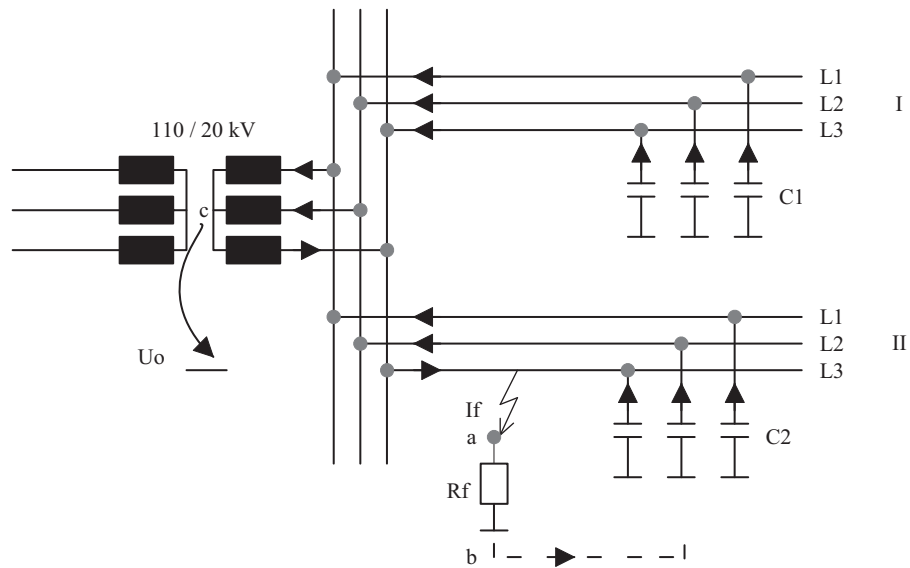
$$\underline{I}_{k1} = \frac{\underline{U}_v}{\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2 + \underline{Z}_0 + 3\underline{Z}_f}. \quad (2.9)$$

Vikaimpedanssi on kolminkertainen, sillä myötä-, vasta- ja nollaverkko muodostavat sarjakytkennän ja näin vikaimpedanssi kolminkertaistuu. (Kothari & Nagrath 2003)

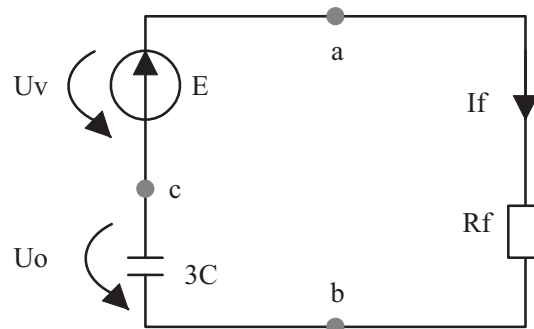
Suomessa on yleisesti käytössä maasta erotettu keskijänniteverkko johtuen Suomen maaperän huonoista maadoitusolosuhteista aiheutuvasta kosketusjänniteongelmasta. Kosketusjännitteen sallittua arvoa määritettäessä pitää huomioida vian kesto-aika, kehon kokonaisimpedanssi ja kehon kautta kulkeva virta. Kosketusjännitteen arvo mitoitetaan sellaiseksi, että se ei aiheuta sähköiskutilanteessa hengen varaa.

Tähän voidaan vaikuttaa sekä maadoitusta parantamalla että releen laukaisuaikaa lyhentämällä tai verkon maasulkuvirtaa pienentämällä. (Lakervi & Partanen 2008)

Maasta erotetussa verkossa kaikkien vaiheiden ja verkon tähtipisteen jännitteet muuttuvat maasulun sattuessa. Tällöin verkossa esiintyy johtojen maakapasitanssien kautta kulkevia kapasitiivisia vikavirtoja. Johtimien ja muuntajakäämien pitkittäisimpedanssit voidaan laskelmissa olettaa nolliksi, sillä ne ovat huomattavasti pienempiä kuin vaihejohtimien maakapasitanssit. Kuvassa 2.4. on esitetty maasta erotetun verkon yksivaiheinen maasulku ja kuvassa 2.5. siitä muodostettu sijaiskytkentä. (Lakervi & Partanen 2008)



Kuva 2.4. Maasta erotetun verkon yksivaiheinen maasulku (Lakervi & Partanen 2008).



Kuva 2.5. Kuvan 2.4. maasulkupiirin sijaiskytkentä (Lakervi & Partanen 2008).

Maasta erotetun verkon maasulkuvirta saadaan laskettua kaavan

$$\underline{I}_0 = \frac{\underline{E}}{R_f + \frac{1}{j3\omega C}} = \frac{j3\omega C}{1 + j3\omega CR_f} \underline{U}_v, \quad (2.10)$$

mukaan, jossa \underline{E} on vikapaikan Théveninin jännite, joka on ennen vikaa olevan vikapaikan vaihejännitteen suuruinen, R_f on vikaresistanssi, j on imaginääriyksikkö, $\omega = 2\pi f$, jossa f on taajuus, C on johtimien maakapasitanssi, ja \underline{U}_v vikapaikan vaihejännite ennen vikaa. Muuntajan tähtipisteen eli nollajännitteen lausekkeeksi saadaan

$$\underline{U}_0 = \frac{1}{j3\omega C} \cdot (-\underline{I}_0) = \frac{-1}{1 + j3\omega CR_f} \underline{U}_v. \quad (2.11)$$

Suomessa on käytössä keskijänniteverkolla maadoitustapana myös maasulun sammutus. Sammutus toteutetaan verkon tähtipisteseen sijoitetulla sammutuskuristimella, jolloin maasulkuvirtaa ja vikapaikan jännitettä saadaan pienennettyä. Sammutetun verkon maasulkulaskentaa ei tässä työssä kuitenkaan tarkastella, sillä työn lopussa olevassa suunnitteluprojektissa keskijänniteverkon maadoitustavaksi on valittu maasta erotettu verkko. (Lakervi & Partanen 2008)

2.4 Suojareleet

Suojarele on laite, joka toimii sähköverkossa tapahtuneen muutoksen johdosta. Se tarkkailee yhtä tai useampaa verkon suuretta, kuten virtaa tai jännitettä. Kun kyseinen suure ylittää sille asetellun toiminta-arvon, suojarele havahtuu. Rele lähettää toimintakäskyn kytkinlaitteelle ja asetellun toiminta-ajan jälkeen kytkinlaite irrottaa viallisen osan verkosta. Tapahtumasta lähtee tieto myös käytönvalvontajärjestelmälle (Supervisory Control And Data Acquisition, SCADA), joka rekisteröi tapahtuman. SCADAn avulla voidaan muunnella muun muassa releiden toiminta-aikoja ja ohjata kytkinlaitteita manuaalisesti. (Mörsky 1992, Verho 2009)

Suojareleen edellytetään olevan selektiivinen eli se havaitsee viat, mutta laukaisee vasta, kun vika on omalla suojausalueella. Sen edellytetään myös toimivan nopeasti ja havaitsemaan viat herkästi. Suojareleillä pitäisi saada aikaan aukoton suojaus, jossa suojausalueet peittävät osittain toisensa ja näin kaikki alueet ovat suojattuja. Lisäksi niiden pitää olla myös käytettävyydeltään hyviä ja kohtuuhintaisia. Tämän kaiken saavuttaminen on kuitenkin erittäin haastavaa ja pitkäjänteistä, ja aina ei ole edes mahdollista saavuttaa kustannustehokkaasti täysin selektiivistä suojausta. (Mörsky 1992)

2.4.1 Jännitereleet

Jännitereleitä on sekä ali- että ylijännitteitä varten. Alijännitereleitä käytetään muun muassa moottoreiden irrottamiseen verkosta, jotta voidaan välttää ylikuormitus.

Alijännitesuojauksen tehtävä on minimoida vauriot alijännitteiden aikana. Alijännitereleelle pitää myös asettaa aikahidastus, jotta se ei turhaan laukea pikajälleenkytkentöjen (PJK) aikana. (Mörsky 1992)

Nollajännitereleitä käytetään maasulkujen havaitsemiseen aikahidastettuina sekä suunnatun maasulun varasuojana. Tahtigeneraattoreilla käytetään ylijännitereleitä suojaamaan vaarallisilta jännitteennousuilta. Moottoreita suojataan ylijännitereleillä vaihekatkoksilta ja vääriltä vaihejärjestyksiltä mittaamalla vastajännitettä. Jännitereleitä käytetään myös jännitteensäätäjän vikaantumistilanteissa, jolloin jännite joko alenee tai nousee. (Mörsky 1992, Verho 2009)

2.4.2 Taajuusreleet

Taajuusreleitä on sekä yli- että alitaajuustilanteita varten. Alitaajuusreleitä käytetään kuormien irtikytkemiseen verkon häiriötilanteissa eli kun taajuus laskee alle toiminta-arvon. Tärkein sovellus alitaajuusreleille on valtakunnallinen tehonvajaussuojaus. Ylitaajuusreleitä käytetään generaattoreiden suojaukseen. (Mörsky 1992)

2.4.3 Virtareleet

Virtareleitä on neljää eri tyyppiä: hetkellinen ylivirtarele, vakioaikaylivirtarele, käännteisaikaylivirtarele sekä termiseen suojaukseen tarkoitettu lämpörele. Ylivirtareleistä hetkellistä- ja vakioaikaylivirtarelettä käytetään pääasiassa oikosulkusuojaukseen. Hetkellinen ylivirtarele toimii, kun virta ylittää toiminta-arvon, kun taas vakioaikaylivirtarele toimii nimensä mukaisesti asetellun vakio-toiminta-ajan kuluttua toiminta-arvon ylittämisestä. (Mörsky 1992, Vedenjuoksu 2008)

Käännteisaikaylivirtarelettä käytetään ylivirtasuojauksen nopean portaan releenä sekä yhteistoiminnassa sulakkeiden kanssa. Sen toiminta-aika perustuu virran suuruuteen eli rele toimii sitä nopeammin mitä suurempi virta on. Tästä johtuen myös vikavirtojen vaikutusajat lyhenevät. (Mörsky 1992)

Ylivirtareleiden asetteleminen vaatii niiden sijaintipaikan pienimmän ja suurimman oikosulkuvirran tuntemista ja tätä varten pitää tuntea verkon rakenne tarkkaan. Ne asetellaan muutosoikosulkuvirran mukaan. Ylivirtareleitä voidaan käyttää myös suunnattuina, jolloin vikavirran suunta vaikuttaa releen laukaisuun. Kuitenkin esimerkiksi releen lähellä tapahtuvissa kolmivaiheisissa vikaimpedanssittomissa oikosuluissa releen mittaama jännite on hyvin pieni ja se saattaa vaikeuttaa vikavirran suunnan havaitsemista. Tällöin releen tulee toimia ainakin suuntaamattomana, jotta vika saadaan poistettua verkosta. (Mörsky 1992)

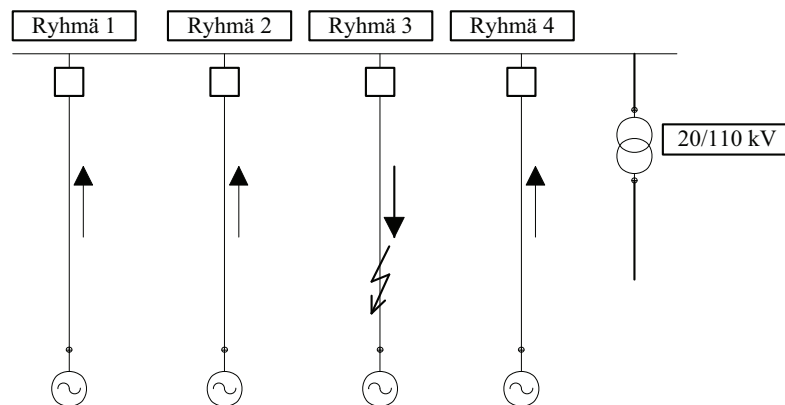
Lämpöreleitä käytetään ylikuormitussuojina moottoreiden, generaattoreiden, muuntajien ja muiden tärkeiden komponenttien yhteydessä. Lämpöreleen läpi kulkee kuormitusvirta. Suojattavan kohteen lämpeneminen on mallinnettu releeseen, ja kun re-

leen lämpötila nousee toimintarajan yli, rele laukaisee katkaisijan. Releen ja suojattavan kohteen lämpenemisaikavakioiden on oltava lähes yhtä suuret, jotta ne vastaisivat mahdollisimman tarkasti toisiaan, jolloin suojaus on mahdollisimman tarkka. (Mörsky 1992, Vedenjuoksu 2008)

2.4.4 Suunta- ja tehoreleet

Suunta- ja tehoreleet mittaavat virtaa ja jännitettä ja muodostavat näistä suojattavan kohteen läpi kulkevan tehon. Suuntareleet mittaavat myös virran ja jännitteen välistä kulmaa. Suunnatussa ylivirtasuojauksessa, jota käytetään yleensä silmukoituissa verkoissa, suojaus perustuu vaihevirtojen arvoihin sekä vaihevirtojen ja pääjännitteiden vaihe-erojen suuruuteen. Suunnatussa maasulkusuojauksessa, jota käytetään maasta erotetussa tai kompensoidussa verkossa, suojaus perustuu nollavirran ja nollajännitteen suuruuteen sekä niiden välisen vaihe-eron suuruuteen. Osana maasulkusuojausta voidaan suojautua myös katkeilevalta maasululta, jolloin suoja-releeseen asetellaan laukaisuehdoksi tietty määrä tietyn suuruisia nollavirtapiikkejä asetellulla aikavälillä. (Mörsky 1992, Pekkala 2010)

Suunnatun suojauksen ansiosta rele toimii vain sille asetellun suojausalueen viassa ja näin päästään estämään esimerkiksi turhat laukaisut viereisen johtolähdön viassa. Kuvassa 2.6. on esitetty terveen lähdön turhan laukaisun estäminen. Kun ryhmälähdöllä 3 on vika, sen suunnattu rele laukaisee, mutta muiden lähtöjen releet eivät laukaise. (Verho 2009)



Kuva 2.6. Terveen lähdön turhan laukaisun estäminen.

Takatehorele mittaa pätötehon suuntaa ja siten estää generaattorin ja sitä pyörittävän voimakoneen toimimisen moottorina. Takatehorelettä käytetään erityisesti generaattoria pyörittävän tuuliturbiinin suojana. Takatehorelettä ei kuitenkaan voida käyttää silloin, kun tahtigeneraattoria käytetään loistehon kompensointiin. Tällöin

generaattorin on otettava tarvittaessa tehoa verkosta tahtimoottorina toimiessaan. (Mörsky 1992, Verho 2009)

2.4.5 Epäsymmetriareleet

Kun kuormitusvirtaan tulee myötäkomponentin lisäksi vastakomponentti, kolmivaihejärjestelmän kuormitus muuttuu epäsymmetriseksi eli vinoksi. Epäsymmetrisen kuormitusvirran johdosta syntyy jännitehäviöitä ja jännitteeseen vastakomponentti. (Mörsky 1992, Verho 2009)

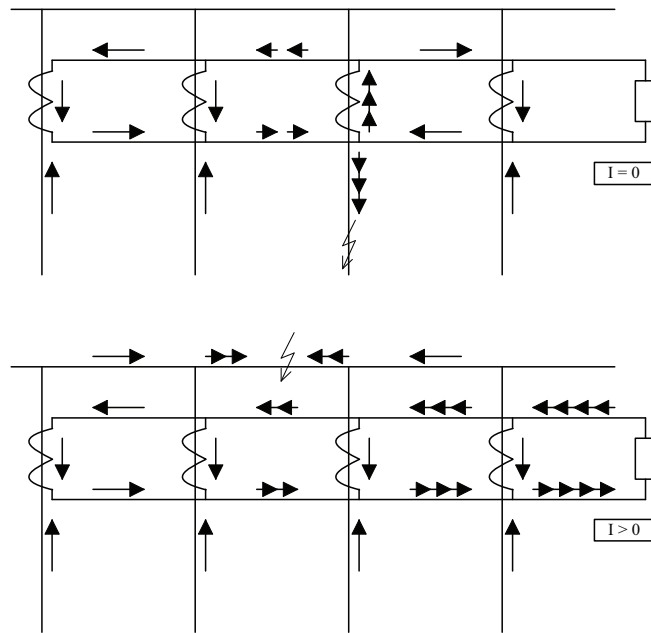
Virran vastakomponentti aiheuttaa koneissa päävuota vastaan pyörivän magneettivuon. Pyörivä magneettivuo synnyttää moottorin pyörintää vastustavan vääntömomentin, josta aiheutuu vaarallista tärinää ja ylikuumenemista. Tätä varten koneita suojataan epäsymmetriareleillä. (Mörsky 1992)

Useimmiten vinoja kuormituksia syntyy yksi- ja kaksivaiheisten oikosulkujen sekä johdon yhden tai kahden vaiheen katkeamisen johdosta. Oikosulut saadaan kuitenkin hoidettua oikosulkusuojilla nopeasti. Johdinkatkeamien havaitseminen onkin vaikeampaa ja niitä varten epäsymmetriareleitä ei voi asetella kovinkaan herkäälle, jotta ne eivät turhaan laukaise kuormitustilanteiden muuttuessa. Myös tavalliset kaksivaiheiset kuormitukset aiheuttavat vastakomponentin jännitteeseen ja virtaan, ja siksi olisikin hyvä asentaa kuormitukset tasaisesti kaikille kolmelle vaiheelle. (Mörsky 1992, Pekkala 2010)

2.4.6 Differentiaalireleet

Differentiaalireleet mittaavat suojausalueellensa tulevien ja lähtevien virtojen erotusta eli erovirtaa. Jos suojausalueella on vika, virtojen amplitudit, vaihekulmat tai molemmat poikkeavat toisistaan huomattavasti. Näin differentiaalireleet ovat täysin selektiivisiä eli suojaavat vain omalla suojausalueella olevilta vioilta. Täten ne eivät myöskään toimi muiden alueiden varasuojana, mutta tarvitsevat kuitenkin itselleen varasuojan. Differentiaalisuojat ovat myös vakavoituja kuormitusvirran suhteen eli ne tarvitsevat havahtumiseen sitä suuremman erovirran mitä suurempi kuormitusvirta on. Kuvassa 2.7. on esitetty kiskosuojaus differentiaalireleellä. Ylemmästä kuvasta huomataan, että johtoviassa releen havaitsema erovirta on nolla ja näin ollen se ei reagoi. Kiskossa olevassa viassa releen havaitsema virta on kuitenkin suurempi kuin nolla, ja näin se havahtuu, kuten alemmasta kuvasta nähdään. (Mörsky 1992, Verho 2009)

Differentiaalisuojat ovat nopeimpia oikosulkusuojia ja siksi hyvin suosittuja muuntajan, generaattorin ja kiskoston suojina. Niiden toiminta-aika on vain 1 – 2 virran jaksonajan luokkaa. Differentiaalisuojia käytetään myös johtojen suojaukseen. (Mörsky 1992, Verho 2009)



Kuva 2.7. Kiskosuojauksen toteutus differentiaalireleellä (Mörsky 1992).

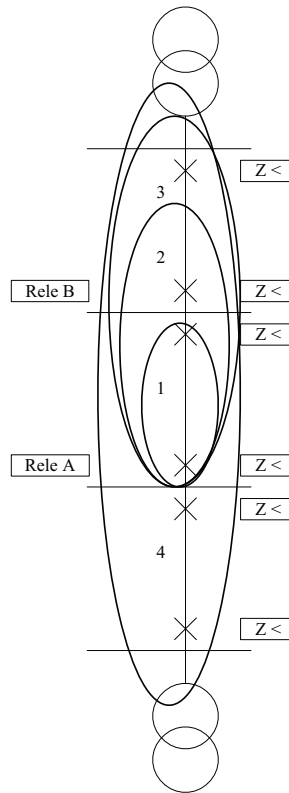
2.4.7 Distanssireleet

Distanssireleitä kutsutaan etäisyysreleiksi, sillä ne mittaavat jännitteitä ja virtoja ja laskevat niistä impedanssin, joka on verrannollinen etäisyyteen. Distanssireleitä käytetään yleensä silmukoidun siirtoverkon selektiiviseen suojaamiseen. Niiden toimintaperiaatteena on laukaista oikosulkua lähin katkaisija ja irrottaa vain viallinen verkon osa. Distanssireleen toiminta-aika on sitä lyhyempi mitä lähempänä vika sijaitsee. (Mörsky 1992, Vedenjuoksu 2008)

Distanssireleellä on useimmiten monta eri toimintavyöhykettä, jolloin saadaan kattettua suojattavaa kohdetta suurempi alue ja varasuojaus viereisille suojausalueille. Kuvassa 2.8. on esitetty distanssisuojauksen toiminta releen A kannalta. Vyöhyke 1 ulottuu suurin piirtein releen vasta-asemalle, ja sen laukaisuaika on lyhin. Vyöhyke 2 ulottuu vasta-aseman yli, mutta ei ihan seuraavalle vasta-asemalle asti, ja toimii täten myös releen B varasuojana. Releen A toinen vyöhyke ei saa kuitenkaan laukaista ennen releen B ensimmäistä vyöhykettä. Kolmas vyöhyke ulottuu vasta-aseman vasta-asemalle ja neljäs vyöhyke eli havahtumisvyöhyke tarkastelee myös releen takana olevia vikoja. (Mörsky 1992, Vedenjuoksu 2008, Verho 2009)

Distanssireleet toimivat hyvin johtosuojina, sillä viestiyhteys ei ole välttämätön. Viestiyhteydestä on kuitenkin hyötyä, ja sitä käytetään laukaisun nopeuttamiseksi ja selektiivisyyden parantamiseksi. Kun suojausalueen toisessa päässä rele havahtuu ja lähettää tästä signaalin, oikea rele osaa silloin laukaista nopeammin. Distanssirelettä voidaan käyttää samaan aikaan sekä oikosulku- että maasulkusuojana, mutta tällöin siinä on oltava erilliset havahtumiselimet molemmille vikatyypeille jokaisessa

vaiheessa. (Vedenjuoksu 2008)



Kuva 2.8. *Distanssisuojaus releen A kannalta (Verho 2009).*

2.4.8 Muut suojalaitteet

Verkon suojauksessa saatetaan tarvita myös muita suojalaitteita kuten valokaari-suojaa ja erilaisia valvojia. Valokaarelta täytyy suojautua, sillä valokaaren syttyessä lämpötila ja paine nousevat huomattavasti ja valokaari saattaa aiheuttaa tulipalon, kun muun muassa kaapeleiden eristeet syttyvät lämmöstä palamaan. Tulipalosta syntyy usein myös myrkyllisiä kaasuja eristeiden ja metallien palaessa. Valokaari-suojaa käytetään sähköasemilla oikosulkusuojauksen täydentämiseen. Siinä on toisiinsa valokuidulla kytketyt valoanturit, jotka kiertävät kojeistossa. Valokaarirele mittaa joko pelkkää valoa tai valoa ja ylivirtaa. Valokaarireleet ovat erittäin nopeita ja sähköaseman oikosulkusuojauksen kanssa toimiessaan suojauksesta saadaan selektiivinen. (Hämäläinen 2008, Verho 2009)

Lisäksi suojauksessa käytetään paljon erilaisia valvojia, jotka eivät mittaa mitään sähköisiä suureita, mutta toimivat kuitenkin releiden tavoin eli ohjaavat katkaisijoita. Valvojia käytetään muun muassa paineen ja kierrosnopeuden mittaamiseen. Tunnetuin valvoja on todennäköisesti tehomuuntajissa käytetty Buchholz-kaasurele, joka on sijoitettu muuntajasäiliön ja paisuntasäiliön väliseen yhdysputkeen. Putkessa

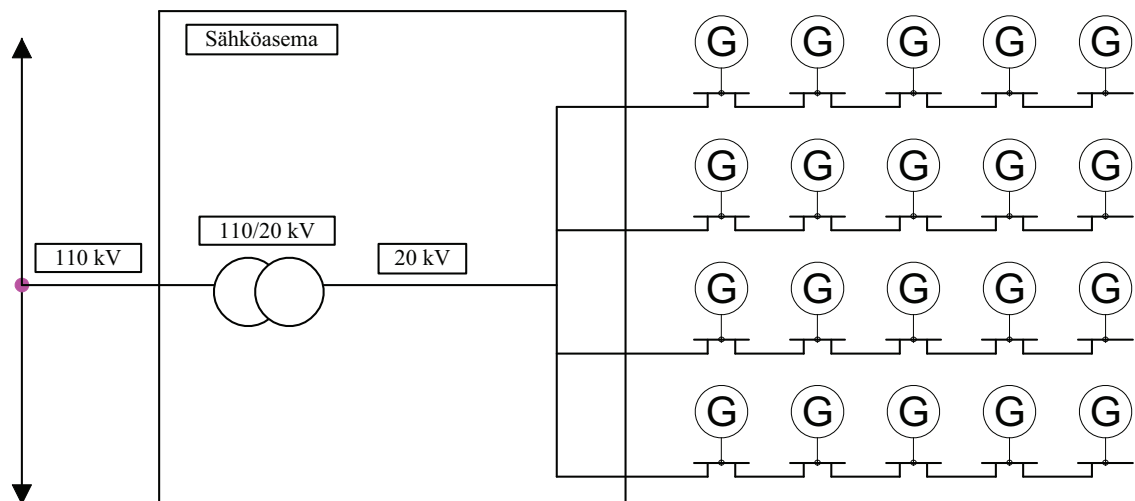
on normaalitilanteessa muuntajaöljyä, mutta ylikuumentumisen tai valokaaren sattuessa öljy kaasuuntuu. Tällöin rele havahtuu ja sulkee laukaisupiirin. (Verho 2009)

Myös tahdissaolon valvoja on erittäin tärkeä valvoja. Se tarkistaa jännite-, taajuus- ja kulmaeron katkaisijan molemmiin puolin, ja antaa luvan kytkennälle, jos nämä suureet ovat asetelluissa rajoissa. Tahdissaolon valvojaa käytetään aina 220 kV:n ja 400 kV:n järjestelmissä ja tarvittaessa myös 110 kV:n järjestelmissä. Tahdissaolon valvoja pitää olla käytössä myös silloin, kun katkaisija joudutaan kytkemään käsin.

Muuntajan käämissä käytetään valvojaa valvomaan käämin lämpötilaa. Sen toiminta perustuu muuntajaöljyn lämpötilan ja kuormitusvirran mittaamiseen. Näiden avulla voidaan määrittää muuntajan kuumimman pisteen lämpötila, joka määrittää muuntajan kuormitettavuuden. (Mörsky 1992, Verho 2009)

3. TUULIPUISTON SÄHKÖVERKON KOMPONENTIT

Tuulipuisto koostuu useasta tuulivoimalasta, sähköasemasta, niiden välisestä keski-jänniteverkosta ja suurjänniteliitännästä. Kuvassa 3.1. on esitetty tuulipuiston periaatteellinen kuva. Myös itse tuulivoimala voidaan jakaa useampaan sähköiseen komponenttiin, kuten generaattoriin, taajuudenmuuttajaan ja RMU-kojeistoon. Lisäksi tuulipuistossa saatetaan käyttää erilaisia kompensointilaitteistoja. Seuraavassa on esitelty edellä mainitut komponentit ja niiden suojaus.

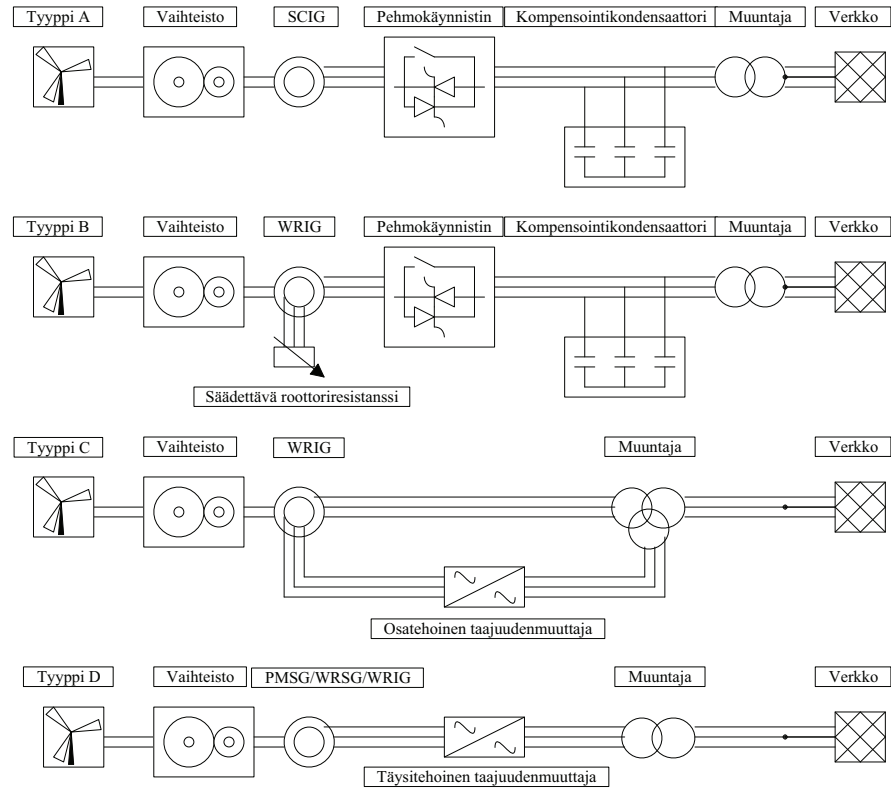


Kuva 3.1. Tuulipuiston periaatteellinen kuva.

3.1 Generaattori ja mahdollinen taajuudenmuuttaja

Tuulivoimalakonsepteja on olemassa neljä eri tyyppiä, ja ne on jaettu pyörimisnopeuden mukaan. Mitä suurempi pyörimisnopeusalue tuulivoimalalla on, sitä paremmin se pystyy hyödyntämään tuulen nopeuden vaihtelut. Tyyppi A on kiinteänopeuksinen tuulivoimakäyttö, jossa on oikosulkugeneraattori. Tyyppi B on rajoitetusti

muuttuvanopeuksinen liukurengaskäyttö. Tyypit C ja D ovat puolestaan muuttuvanopeuksisia tuulivoimakäyttöjä, mutta C:ssä on osatehoinen taajuudenmuuttaja ja D:ssä täysitehoinen taajuudenmuuttaja. Näistä A- ja B-tyypit ovat vanhempaa teknologiaa ja jäämässä taka-alalle, kun C- ja D-tyypit valtaavat markkinoita. Kuvassa 3.2. on esitetty kaikkien tuulivoimalatyypien periaatekuvat.



Kuva 3.2. Tuulivoimalatyypit; SCIG = squirrel cage induction generator, WRIG = wound rotor induction generator, PMSG = permanent magnet synchronous generator, WRSG = wound rotor synchronous generator. Tyypissä D vaihteisto ei ole pakollinen. (Mäkinen 2010)

Tyypin A tuulivoimalassa on siis oikosulkugeneraattori (squirrel cage induction generator, SCIG), joka on kytketty muuntajan välityksellä suoraan verkkoon. Se on kiinteänopeuksinen, sillä sen pyörimisnopeus voi muuttua vain generaattorin jättämällä verran, joka on muutaman prosentin luokkaa. Yksinkertaisuudesta johtuen tyypin A tuulivoimalalla on vähäinen huoltotarve ja lisäksi se on edullinen. Teknisesti se ei kuitenkaan ole kovin vakaa, sillä se aiheuttaa suuria tehoheilahteluita varsinkin heikoissa verkoissa tuulen nopeuden muuttuessa nopeasti. Lisäksi se ottaa magnetointia varten 7 – 8 kertaa nimellisen suuruisen virran verkosta käynnistyessään. Tämän vuoksi tuulipuistojen voimaloita ei voida kytkeä yhtä aikaa verkkoon, sillä yhdenkin tuulivoimalan käynnistäminen rasittaa verkon jännitettä. (Ackermann 2005, Mäkinen 2010)

Käynnistysvirran suuruutta voidaan rajoittaa ottamalla käyttöön pehmokäynnistin. Pehmokäynnistimessä on vastarinnankytketyt tyristorit, jotka nostavat generaattorin jännitettä asteittain ja pitävät virran amplitudin korkeimmillaan nimellisen suuruisena. Käynnistuksen jälkeen tyristorit ohitetaan ja häviöt pienenevät. Oikosulkugeneraattori ottaa magnetointia varten myös loistehoa verkosta ja tämä taas heikentää tuulivoimalan liityntäpisteen tehokerrointa. Tehokerrointa voidaan kuitenkin parantaa ottamalla käyttöön rinnalle asetettava kompensointikondensaattoriparisto. Tyypin A tuulivoimala aiheuttaa kaikesta huolimatta verkkoon jännitteen laatuongelmia tuulenpuuskista ja kompensointikondensaattoreiden kytkennöistä johtuen. (Ackermann 2005, Mäkinen 2010)

Tyypin B tuulivoimala on hyvin samankaltainen kuin tyypin A tuulivoimala. Eroa on vain generaattori, joka tyypissä B on liukurengasepätahtigeneraattori (wound rotor induction generator, WRIG). Myös B-tyypin tuulivoimala tarvitsee sekä pehmokäynnistimen rajoittaakseen käynnistysvirtoja että kompensointikondensaattorin parantamaan liityntäpisteen tehokerrointa. Tyypin B tuulivoimala on kuitenkin monimutkaisempi rakenteeltaan kuin tyypin A, ja siksi myös kalliimpi. Tyypin B tuulivoimala voidaan toteuttaa joko ulkoisella suuntaajalla, jolla ohjataan roottoriresistanssia, tai sisäisellä suuntaajalla, jolla ohjataan roottoriin sijoitettua muuteltavissa olevaa resistanssia. Sisäisellä suuntaajalla päästään säätämään roottorin kokonaisresistanssia sekä generaattorin jättämää ja pyörimisnopeutta. Pyörimisnopeusalue saadaan nostettua 0–10 %:a synkronisen pyörimisnopeuden yläpuolelle. Tähän päästään roottorihäviöitä kasvattamalla, mutta se heikentää energiantuotannon hyötysuhdetta. Se tasaa kuitenkin tuulenpuuskissa ulostulotehoa, ja täten mekaaniset rasitukset pienenevät ja tuulivoimalan elinikä kasvaa. Tanskalainen Vestas Wind Systems on kehittänyt optisesti ohjatun suuntaajan, jonka avulla päästään eroon liukurengaista ja näin huoltotarve ja kunnossapito vähenevät. Tyypin B tuulivoimala on kuitenkin menettänyt markkinaosuuttaan tyyppille C, sillä se pystyy vielä parempaan pyörimisnopeusalueeseen ja ylimääräinen jättämäenergia voidaan syöttää verkkoon, kun tyyppillä B se kuluu lämmöksi. (Ackermann 2005, Mäkinen 2010)

Tyypin C tuulivoimalassa on käytetty kaksoissyötettyä liukurengasepätahtigeneraattoria (WRIG) ja osateholle mitoitettua taajuudenmuuttajaa. Generaattorin staattori on kytketty suoraan verkkoon ja roottori taajuudenmuuttajan välityksellä. Pyörimisnopeusalueutta saadaan näin kasvatettua ± 30 %:iin synkronisen pyörimisnopeuden ympärillä. Generaattorin ylimääräinen jättämäteho voidaan siis siirtää verkkoon taajuudenmuuttajan läpi. Tämä teho on korkeintaan 30 %:a nimellistehosta. Tämän vuoksi taajuudenmuuttaja ja siihen liittyvä suodin mitoitetaan 30 %:n nimellistehon mukaan, ja näin saadaan huomattavasti edullisempi konsepti kuin tyypin D tuulivoimalakonsepti. Myös taajuudenmuuttajan häviöt pysyvät pieninä, koska vain osa tehosta kulkee sen lävitse. Myöskään pehmokäynnistimelle ja kompen-

sointikondensaattoreille ei ole enää tarvetta, sillä taajuudenmuuttajalla voidaan rajoittaa käynnistysvirtoja ja tuottaa tuulivoimalan tarvitsema määrä loistehoa. Taajuudenmuuttajalla voidaan siis säätää loistehon suuruus halutuksi ja täten tuulivoimalaa voidaan ajaa tehokertoimella yksi. Tyypin C tuulivoimalan haittapuolina ovat liukurenkaat ja harjat, jotka vaativat huoltoa ja kunnossapitoa. Myös suuntaaja saattaa hajota ilman kunnollista suojausta, sillä vian seurauksena roottorivirrät kasvavat ja ne saattavat rikkoa suuntaajan. (Ackermann 2005, Mäkinen 2010)

Tyypin D tuulivoimalassa on täydelle teholle mitoitettu taajuudenmuuttaja eli kaikki generaattorin tuottama teho menee taajuudenmuuttajan lävitse verkkoon. Generaattorina tyypin D voimaloissa voidaan käyttää kestopagneettitahtigeneraattoria (permanent magnet synchronous generator, PMSG), käämittyä tahtigeneraattoria (wound rotor synchronous generator, WRSG) tai liukurengasepätahtigeneraattoria (WRIG). Kestopagneettitahtigeneraattorilla on hyvä hyötysuhde ja se pysyy magnetoimaan itsensä kestopagneettien avulla. PMSG on kuitenkin kallis ja sen magnetointi on kestopagneeteista johtuen aina vakio. Kestopagneettien magneettiset ominaisuudet myös heikkenevät lämpötilan noustessa yli Curie-lämpötilan. Curie-lämpötilassa ferromagneettiset aineet muuttuvat paramagneettisiksi ja magneettiset ominaisuudet häviävät. Ne saadaan palautettua lämpötilan jälleen laskiessa alle Curie-lämpötilan. Tällöin tuuletuksen merkitys kasvaa ja se pitää muistaa ottaa huomioon. Myös WRSG:n magnetointivirtaa voidaan säätää erillisellä laitteistolla, mutta tämä heikentää hyötysuhdetta. WRIG taas on edullinen ja luotettava generaattori, mutta se ottaa magnetointivirtansa taajuudenmuuttajasta. Moninapaisen tahtigeneraattorin avulla voidaan voimaloista tehdä vaihteettomia. Moninapaiset generaattorit ovat tosin suurempia ja painavampia, ja tämän vuoksi myös nasellin eli konehuoneen pitää olla kestävämpi. Kuitenkin vaihteisto on hyvin herkkä rikkoutumaan ja aiheuttaa paljon huoltotoimia, joten siksi sen käyttöä koitetaan vähentää. (Ackermann 2005, Dorf 2006, Mäkinen 2010)

Täyden tehon taajuudenmuuttajan ansiosta tyypin D tuulivoimalan pyörimisnopeutta pystytään säätämään vapaasti. Myös sen tuottaman ja kuluttaman loistehon suuruuteen voidaan vaikuttaa ja tehokerroin voidaan asettaa halutuksi. Haittana on kuitenkin taajuudenmuuttajan koko verrattuna tyypin C tuulivoimalaan, jossa on 30 %:n teholla mitoitettu taajuudenmuuttaja. Täyden tehon taajuudenmuuttaja on kalliimpi, kooltaan suurempi ja häviöt suuremmat. Hyvinä puolina on kuitenkin tuulivoimalan erittäin hyvä ohjattavuus myös vikatilanteissa ja suuri loistehon syöttökapasiteetti. WinWinD Oy:n WWD3-tuuliturbiini pystyy syöttämään jopa ± 2 MVar loistehoa vian aikana, kun pätötehon tuotanto on nolla. (Ackermann 2005, Jaakola & Pääkkilä 2010, Mäkinen 2010)

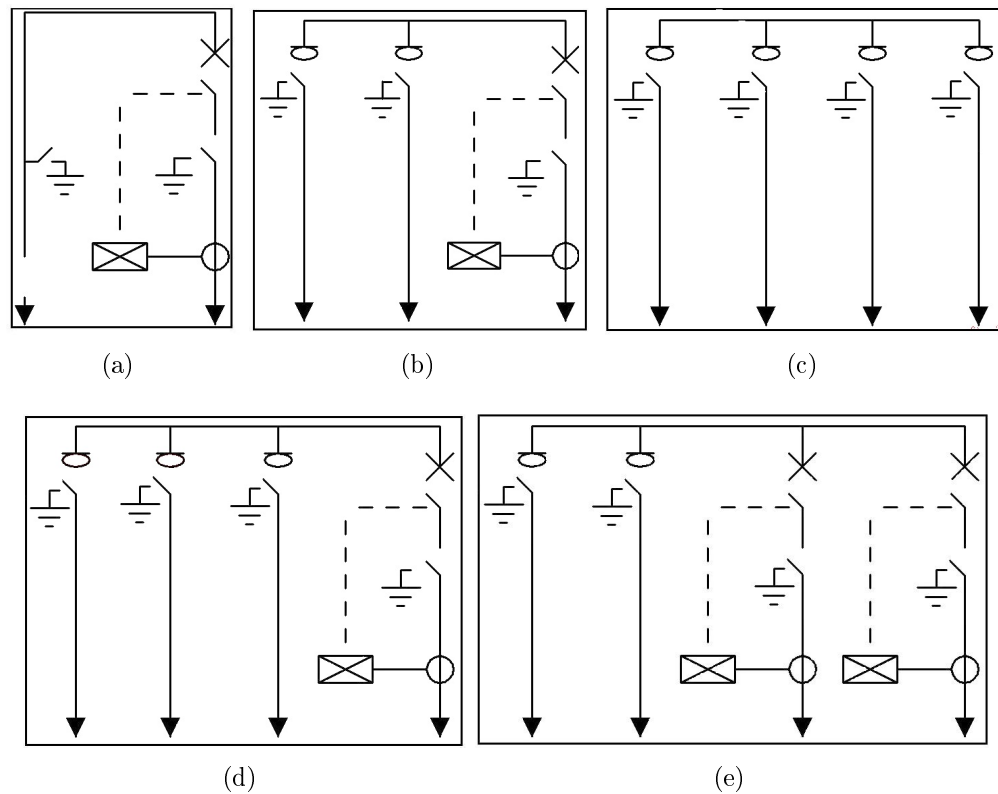
Tyypin D tuulivoimaloiden generaattorit voidaan suojata ainakin yli- ja alitaajuusreleillä, yli- ja alijännitereleillä sekä yli- ja alivirtareleillä. Taajuusmuuttajat voi-

daan suojata molemmin puolin differentiaalireleillä, tasasähköylijännitereleillä, nolavirtareleillä, ylitaajuusreleillä ja kaksiporaisella ylivirtareleellä. Näiden lisäksi verkon puolella voidaan käyttää vielä alitaajuusrelettä ja yli- ja alijänniterelettä vaihejännitteille. Taajuusmuuttajan ja tuulivoimalan muuntajan välissä voidaan käyttää lisäksi kaksiporaisista ylivirtasuojauksista ja ylikuormitussuojauksista. (WinWinD 2010)

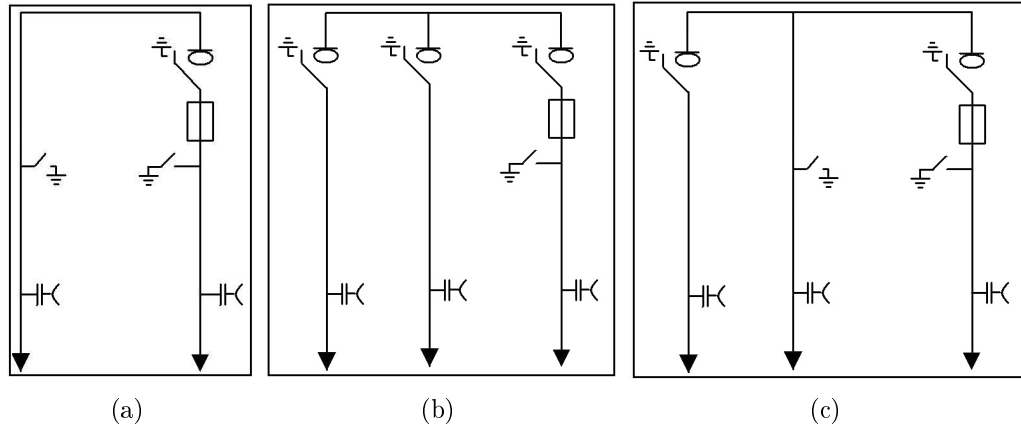
3.2 RMU-kojeisto

Rengassyöttökojeisto (Ring main unit, RMU) on tuulivoimalan muuntajan ja tuulipuiston sähköverkon välissä oleva komponentti. Se voidaan sijoittaa joko tuulivoimalan perustaan tai tuulivoimalan ulkopuolelle. Sen tehtävänä on liittää yksittäisiä voimaloita rinnan, jotta välttyttäisiin yksittäisiltä liityntäjohdoilta sähköasemalla.

RMU-kojeisto koostuu asiakkaan tarpeen mukaan, ja siten erilaisia variaatioita on monia. Kuvassa 3.3. on esitetty ABB:n erilaisia variaatioita ja kuvassa 3.4. Arevan variaatioita. Kuvista voi huomata, että variaatiot ovat hyvin samantapaisia. Näiden lisäksi on saatavilla myös muita variaatioita. (ABB 2010, Areva 2005)



Kuva 3.3. ABB:n RMU-kojeiston variaatioita: (a) suora kaapeliyhteys ja tyhjiökatkaisija, (b) kaksi kuormanerotinta ja tyhjiökatkaisija, (c) neljä kuormanerotinta, (d) kolme kuormanerotinta ja tyhjiökatkaisija ja (e) kaksi kuormanerotinta ja kaksi tyhjiökatkaisijaa (ABB 2010).



Kuva 3.4. Arevan (nykyinen Schneider Electric) RMU-kojeiston variaatioita: (a) kaapeliyhteys maadoituskytkimellä ja muuntajayhteys varokekuormanerottimella (b) kaksi kuormanerotinta ja muuntajayhteys varokekuormanerottimella ja (c) kuormanerotin, kaapeliyhteys maadoituskytkimellä ja muuntajayhteys varokekuormanerottimella (Areva 2005).

RMU-kojeisto sisältää suojalaitteet tuulivoimalan suojaukseen. Se sisältää useimmiten yhden tai useamman kuormanerotimen, tyhjiökatkaisijan tai varokekuormanerotimen. Lisäoptioina on saatavilla muun muassa jännite- ja virtamittareita sekä syöttöjohdoille valokaaren sammutusjärjestelmiä. Eristeenä RMU-kojeistoissa käytetään useimmiten SF_6 -kaasua, mutta myös ilma- ja tyhjiöeriste ovat mahdollisia. WinWinD Oy käyttää RMU-kojeistoissaan ylivirtasuojauksia ja kaksiporaisia nolavirtasuojauksia (WinWinD 2010). (ABB 2010, Areva 2005)

3.3 Tuulipuiston sisäinen keskijänniteverkko puiston sähköaseman kenttään asti

Perinteisessä keskijänniteverkossa on yleensä vain kulutuspisteitä. Suomessa keskijänniteverkon jännite on lähes aina 20 kV:a, mutta jossain kaupungeissa on käytössä myös 10 kV:n jännitetaso. 20 kV:n keskijänniteverkkoa käytetään joko maasta erotettuna tai sammutuskuristimella kompensoituna. Keskijännitejohto suojataan sijoittamalla suojalaitteet sähköasemalle. Suojana käytetään katkaisijaa, jonka yhteydessä on ylivirta-, maasulku- ja jälleenkytkentärele. Avojohtoilla ylivirtarele toimii oikosulku- ja ylikuormitussuojana. (Lakervi & Partanen 2008)

Perinteistä keskijänniteverkkoa käytetään säteittäisenä, vaikka se usein onkin rakennettu silmukoidusti. Silmukoinnilla saavutetaan parempi käyttövarmuus vika- ja häiriötilanteissa. Toisaalta säteittäiskäytössä verkon oikosulkuvirrat pysyvät pienempinä ja jännitteensäätö ja suojaus ovat helpompia toteuttaa. Rengaskäytöllä saadaan kuitenkin jännitteenalenema ja häviöt pienemmiksi. Taajama-alueilla keskijänniteverkko on kaapeloitu ja silmukoitu, mutta maaseudulla se on pääosin avojohtoa ja

useimmiten myös säteittäisesti rakennettu. Maaseudulla kulutusta on vähemmän, joten on ollut taloudellisempaa rakentaa keskijänniteverkko säteittäisenä avojohtona, jonka korjaus on nopeampaa ja pienen kulutuksen vuoksi ei ole niin kiire saada korvaavaa yhteyttä kuin kaupungissa, jossa kulutusta on paljon ja katkosta kärsiviä huomattavasti enemmän. (Lakervi & Partanen 2008)

Tuulipuiston keskijänniteverkko eroaa perinteisestä keskijänniteverkosta siten, että siinä ei ole varsinaista kulutusta ollenkaan, lukuun ottamatta puiston omakäyttöä. Tuulipuiston keskijänniteverkossa teho kulkee siis voimaloista sähköasemalle päin, kun perinteisessä verkossa se kulkee sähköasemalta kuluttajille päin. Tuulipuiston keskijänniteverkko on yleensä myös kaapeloitu ja ainakin osittain silmukoitua verkkoa RMU-kojeistojen avulla. Verkkoa käytetään kuitenkin säteittäisenä kuten perinteistäkin keskijänniteverkkoa suojauksen toteuttamisen helpottamiseksi.

Koska tuulipuiston keskijänniteverkko on useimmiten kaapeloitu, ovat johdinkatkeamat hyvin harvinaisia. Jos kaapeli jostain syystä vaurioituu niin, että esimerkiksi yksi vaihe katkeaa, on se lähes aina suoraan maan kanssa kosketuksissa. Kaapeleiden katkeamat ovat kuitenkin harvinaisia ja johtuvat useimmiten kaivutöistä. Maasulkuja voi kuitenkin tulla esimerkiksi eristeen hapertuessa, jolloin kaapeliin pääsee nestettä, joka muodostaa yhteyden maahan.

Tuulipuiston keskijänniteverkko koostuu usein eri johdinpoikkipintaisista kaapeleista. Mitä lähempänä sähköasemaa ollaan, sitä paksumpaa kaapelia käytetään, koska kaapelissa kulkeva tehon määrä kasvaa lähestyttäessä asemaa. Kaapelit kaivetaan usein tuuliturbiinien huoltoteiden varrelle ja tällöin niiden pituus ei välttämättä ole lyhin mahdollinen, mutta asennus on yksinkertaisinta.

Tuulipuistossa teho kulkee siis voimaloilta sähköasemalle päin, jonka vuoksi sähköasemalla käytetään suunnattuja suoja, jotta pystytään erottamaan vikavirran kulkusuunta. Tämän avulla pystytään estämään terveen tuuliturbiinilähdön turhat keskeytykset, kun vika on viereisellä lähdöllä.

3.4 Tuulipuiston sähköaseman tehomuuntajat

Tuulipuiston sähköasemalla sijaitsevat tehomuuntajat suojataan kuten muidenkin sähköasemien muuntajat. Sähköasemalla on differentiaali-, ylivirta- ja maasulkusuoja ja muuntajaa varten. Näiden lisäksi itse muuntajassa käytetään kaasurelettä, öljyn lämpötilamittaria ja käämikytkimen suojaurelettä suojaamassa muuntajaa. Kaasurelle suojaa paikalliselta ylikuumenemiselta, purkaus- tai valokaari-ilmiöiltä ja sisäisiltä oikosuluilta. Öljyn lämpömittari valvoo öljyn lämpötilaa, ja siinä on hälytys- ja laukaisukoskettimet suojausta varten. (ABB 2003, Mörsky 1992)

3.5 110, 220 tai 400 kV:n liityntäjohto

Tuulipuistot liitetään usein 110, 220 tai 400 kV:n verkkoon johtuen niiden suuresta tehosta. 110, 220 ja 400 kV:n verkot ovat Suomessa suurimmalta osin kantaverkkoa, mutta jonkin verran 110 kV:n verkosta kuuluu myös alueverkkoon. Kantaverkon liityntää valvoo Fingrid Oyj ja alueverkkojen liityntää alueverkkoyhtiöt.

Suomessa 110 kV verkko on suurimmaksi osaksi maadoitettu suoraan tai maadoituskuristimella. Lapin koko 110 kV:n verkko on sammutettu maadoituskuristimella. Suoraan ja maadoituskuristimen avulla maadoittamalla saadaan maasulkuvirtaa rajoitettua, jotta maadoitusjännite vikapaikassa pienenee. Toisaalta maasulkuvirran tulisi olla kuitenkin sen verran suuri, että sillä voidaan taata selektiivinen suojaus. 110 kV:n johdolla käytetään pääsuojana distanssirelettä, johon on integroitu suunnattu maasulkusuoja ja jälleenkytkentätoiminto. Varalla käytetään käänteisaikavirtarelettä. Lyhyillä säteittäisjohdoilla voidaan distanssirele korvata vakioaikavirtareleellä. Tahdissaolon valvojaa käytetään tarvittaessa. (Lindblad et al. 2009, Mörsky 1992)

220 ja 400 kV:n verkot ovat tehollisesti maadoitettuja eli ne ovat maadoitettuja jokaisella muuntoasemallaan joko suoraan tai maadoituskuristimella. Tällöin maasulkuvirrat ovat suuria ja näin saadaan releet toimimaan nopeasti ja selektiivisesti. 220 kV:n johdon suojaus toteutetaan samalla tavalla kuin 110 kV:n johdon suojaus. 400 kV:n johdolla on aina kaksi pääsuojarelettä, joina käytetään joko kahta distanssirelettä tai yhtä distanssirelettä ja yhtä johtodifferentiaalisuojaa. Lisäksi käytetään erillistä nollavirta- ja jälleenkytkentärelettä. Tahdissaolon valvojaa käytetään aina sekä 220 kV:n että 400 kV:n johdoilla. (Lindblad et al. 2009, Mörsky 1992)

3.6 Muut mahdolliset komponentit

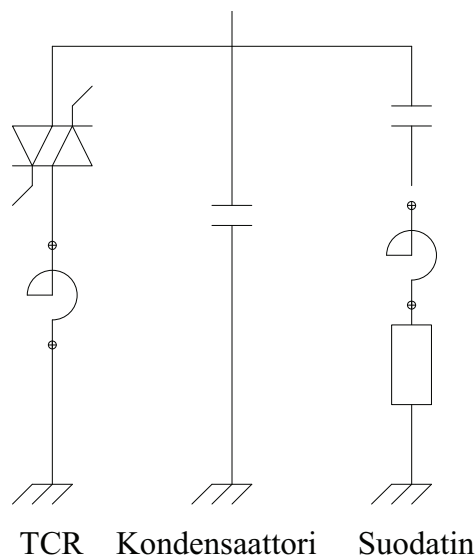
Tuulipuistojen muita mahdollisia komponentteja tuulipuistossa ovat erilaiset kompensointi- ja suodatinlaitteet. Tämänlaisia laitteita ovat muun muassa reaktori, erilaiset suodattimet, staattinen loistehon kompensattori (Static var compensator, SVC) ja staattinen synkronikompensaattori (Static synchronous compensator, STATCOM). Näitä laitteita tarvitaan sähköön laadun parantamiseen. Sähköön laatua saadaan parannettua loistehoa kompensoimalla, jännitetasoa nostamalla ja yliaaltoja suodattamalla. Loistehoa saadaan kompensoitua reaktoreiden, SVC- ja STATCOM-laitteiden avulla. (Nokian Capacitors 2006)

Reaktoreita on olemassa muun muassa vaimennus-, suodatin-, rinnakkais-, virranrajoitus- ja tyristoriohjattuja reaktoreita ja maadoituskuristimia. Tuulipuistoissa käytetään pääosin vain suodatinreaktoreita tai maadoituskuristimia sekä SVC- ja STATCOM-laitoksissa tyristoriohjattuja reaktoreita (Thyristor controlled reactor, TCR). Suodatinreaktorilla suodatetaan nimensä mukaisesti yliaaltoja ja lisäk-

si niillä voidaan tuottaa loistehoa. Maadoitusreaktoreita käytetään maasulkuvirran rajoittamiseen. Reaktorit suojataan yleensä differentiaalisuojalla tai yhdistetyllä ylivirta- ja maasulkusuojalla. Reaktoritkaan eivät ole pakollinen komponentti tuulipuistossa, vaan niitä käytetään vain tarpeen vaatiessa, esimerkiksi maasulkuvirran rajoittamiseen. (The Electricity Training Association 1997, Mörsky 1992, Nokian Capacitors 2006)

Suodattimia käytetään varsinkin taajuusmuuttajakäyttöisissä tuulivoimaloissa suodattamassa taajuusmuuttajan aiheuttamia harmonisia yliaaltoja. Yliaaltosuotimet ovat yleensä koottu kondensaattoreiden ja kuristimien yhdistelmistä. WinWinD Oy käyttää LCL-suodatinta omissa voimaloissaan (Jaakola & Päckilä 2010). Tuulivoimaloissa suodattimia ei varsinaisesti suojata, vaan ne ovat koko tuulivoimalan suojausvyöhykkeellä, sillä ne on sijoitettu taajuusmuuttajan ja tuulivoimalan muuntajan väliin. (WinWinD 2010)

SVC- ja STATCOM-laitoksia käytetään yleisesti sähkön laadun parantamiseen. Näiden toiminta perustuu tyristoriohjattujen reaktoreiden portaattomaan loistehon säätöön, kun taas perinteisissä reaktori- ja kondensaattoriratkaisuissa säätö on portaattaista. Kuvassa 3.5. on yksi esimerkki SVC-laitteiston kokoonpanosta. Tuulivoimaloissa niiden käyttö kohdistuu usein jännitteen stabiloimiseen vikatilanteissa, loistehon kompensointiin ja yliaaltojen suodattamiseen. SVC- ja STATCOM-laitteet sijoitetaan joko tuulipuiston sähköasemalle tai verkon liityntäpisteeseen, ja ne mitoitetaan koko puiston tarpeen mukaan. Näiden suojalaitteina käytetään ylivirtasuojia ja maasulkusuojia. SVC- ja STATCOM-laitteisto ja sen kokoonpano määräytyvät aina asiakkaan tarpeen mukaan. (Grünbaum et al. 2004, Peltola 2009)



Kuva 3.5. SVC-laitteisto (NR Electric 2009).

4. VERKKOYHTIÖIDEN VAATIMUKSET VERKKOONLIITYNNÄLLE

Useamman tuulivoimalan tuulipuistot liitetään useimmiten kantaverkkoon tai 110 kV:n alueverkkoon liityntäpisteen suuren tehon vuoksi. Tällöin tehohäviöt ovat pienempiä ja verkko kestää suuren tuotannon lisäyksen paremmin kuin jakeluverkko.

Suomessa kantaverkkoonliityntää säätelee kantaverkkoyhtiö Fingrid Oyj, joka on julkaissut voimassa olevat yleiset liittymisehdot (YLE) ja voimalaitosten järjestelmätekniset vaatimukset (VJV). Alueverkkoon liityntää säätelevät alueverkkoyhtiöt, jotka usein noudattavat Fingrid Oyj:n ehtoja. Fingrid Oyj:n liityntäehdot pohjautuvat Nordelin Nordic Grid Codeen, joka on Pohjoismaiden yhteinen sääntökokoelma koskien verkkoonliityntää. Nordel kuitenkin lopetettiin 1.7.2009 (Nordel 2010), jolloin sen toiminnot ja vastuut siirrettiin ENTSO-E:lle (European Network of Transmission System Operators for Electricity). Toistaiseksi kuitenkin noudatetaan Nordic Grid Codea, kunnes ENTSO-E saa kehitettyä omat vastaavat sääntönsä, jotka ovat valmistuttuaan voimassa koko Euroopan alueella.

4.1 Yleiset liittymisehdot

Yleisten liittymisehtojen tarkoituksena on varmistaa liitettävien verkkojen tekninen yhteensopivuus sekä määrittää sopimusosapuolten oikeudet ja velvollisuudet. Tuulivoimala voidaan liittää Fingrid Oyj:n, alueverkkoyhtiön tai tuulivoimalan omaan kytkinlaitokseen tai haarajohtona Fingrid Oyj:n tai alueverkkoyhtiön johtoon. Tekniset reunaehdot ja liittymän tarve on otettava huomioon, kun liitytään Fingrid Oyj:n verkkoon. Pienitehoiset tuulivoimalat tulee liittää jakelu- tai alueverkkoon, jotta kantaverkon toimintavarmuus ja tehokkuus säilyvät. Varsinkin jakeluverkkoon liityttäessä pitää kuitenkin huomioida, että liityntä on teknisesti ja taloudellisesti mahdollista. (Nordel 2006)

400 kV:n ja 220 kV:n jännitteillä liityntäpiste on katkaisijakenttä kytkinlaitoksessa. 110 kV:n liittymät kytketään kytkinlaitteella johtoon tai kytkinlaitokseen. Johdon maksimipituus saa olla enintään puolet haaroituspisteen etäisyydestä lähimpään kantaverkon suojaavaan katkaisijaan. Käyttövarmuuden kannalta tärkeillä 110 kV:n rengasyhteyksillä haaraajohtoliityntöjä tulee välttää. Katkaisijakentän ja runkojohdon suojaeleistyksessä on käytettävä tahdissaolon valvojaa. (Nordel 2006)

Vähintään 250 MVA:n tuulipuistot liitetään aina 400 kV:n verkkoon. Myös 100–

250 MVA:n tuulipuistot liitetään 400 kV:n verkkoon, jos niitä ei ole verkkotekniset näkökulmat huomioiden järkevä liittää 110 kV:n verkkoon. Alle 100 MVA:n puistot liitetään 110 kV:n verkkoon. 110 kV:n verkon siirtokyky on kuitenkin tarkistettava, jotta verkko kestää tuotannon lisäyksen. Voimajohdon varrelle liitettyissä voimalaitoksissa on oltava eroonkytkentäreleistys, jotta ne saadaan irrotettua verkosta pikajälleenkytkennän jännitteettömänä aikana. (Nordel 2006)

Pohjoismaisessa sähköverkossa taajuuden ohjearvo on 49,9–50,1 Hz:ä, mutta häiriöttömässä tilanteessa taajuus voi vaihdella 49,5–50,5 Hz:n välillä. Häiriön aikana saatetaan joutua toimimaan myös 47,5–53 Hz:n alueella. Myös jännitteelle on omat ohjearvonsa. Normaalisti jännitteen tulisi olla välillä 0,90–1,05 pu, mutta toisinaan häiriön aikana joudutaan toimimaan myös 0,85–1,10 pu:n välillä. Tuulivoimalat tulee suojata siten, että ne eivät vaurioidu taajuuden ja jännitteen muutoksista. Voimaloiden vian aikaiseen käyttäytymiseen liittyviin vaatimuksiin palataan seuraavassa alaluvussa. (Nordel 2006)

Tuulivoimalan suunnittelussa tulee ottaa huomioon sähköverkon vikojen aiheuttamat lyhytaikaiset jännitekuopat, jännitteettömyys ja pika- ja aikajälleenkytkentöjen vaikutukset. Fingrid Oy:llä on oikeus irrottaa tuulivoimala verkosta häiriö- ja vikatilanteissa kantaverkon sähköturvallisuuden ja käyttövarmuuden vaatiessa, mutta myös tuulivoimalan omistajalla on oikeus irrottaa tuulivoimala verkosta häiriö- ja vaaratilanteiden torjumiseksi. Vaatimuksiin, jotka liittyvät voimaloiden käyttäytymiseen suurten jännitteen muutosten aikana palataan myös seuraavassa alaluvussa. (Nordel 2006)

400 kV:n ja 220 kV:n verkot ovat tehollisesti maadoitettuja, joten muuntajan tähtipisteet on maadoitettava joko suoraan tai maasulkuvirtaa rajoittavan maadoituskuristimen kautta. 110 kV:n verkko on vain osittain maadoitettu ja tällöin muuntajan tähtipistettä ei yleensä maadoiteta. Muuntaja suositellaan kuitenkin suojattavan ylijännitteiltä ylijännitesuojalla. (Nordel 2006)

Tuulivoimalan ja kantaverkon suojauksen on toimittava yhdenmukaisesti ja selektiivisesti, jotta verkon käyttövarmuus säilyy. 400 kV:n verkon vian laukaisuaika tulee olla korkeintaan 0,1 s kaikissa vioissa. Suuri-impedanssista maasulkua varten tulee olla suojaus 400 kV:n johdolla. Lisäksi johtojen pääsuojan tulee olla kahdennettu ja täydennetty viestiyhteydellä. (Nordel 2006)

110 kV:n ja 220 kV:n verkkojen suojauksen toiminta-ajan tulisi olla myös enintään 0,1 s ja varasuojauksen toiminta-ajan enintään 0,5 s. Sähköasemilla suojauksen toiminta-aika saa kiskoviassa olla enintään 0,5 s ja varasuojauksen 0,8 s. Silmukoituissa 110 kV:n taajamaverkoissa on kuitenkin pyrittävä enintään 0,1 s toiminta-aikaan. Suuri-impedanssisissa maasuluissa suojauksen toiminta-ajat porrastetaan 1–4 s välille ja ne sovitetaan kantaverkon suojaukseen. 110 kV:n verkon suojauksesta sovitaan aina erikseen, jos johtolähdöllä on kaapeliosuuksia tai jos verkko on sam-

mutettu. (Nordel 2006)

Tuulivoimalan haaraajohtosuojauksen toiminta on aina varmistettava Fingrid Oyj:n tai alueverkkoyhtiön kanssa, sillä kantaverkko on suunniteltu toimimaan vain kanta-verkon johtovioissa. Kantaverkon suojaus saadaan kuitenkin toimimaan myös lyhyiden haaraajohtojen vioissa, mutta ei pitkien haaraajohtojen ja johdon varrella olevien muuntajien suojana. (Nordel 2006)

4.2 Voimalaitosten järjestelmätekniset vaatimukset

Voimalaitosten järjestelmäteknisten vaatimusten tarkoituksena on varmistaa voimalaitosten ja sähköverkon toiminta kokonaisuutena kaikissa verkon käyttötilanteissa, myös häiriötilanteissa. Voimalaitosten tulee pysyä verkossa ja toimia luotettavasti häiriötilanteessa.

VJV koskevat kaikkia yli 10 MVA:n tuulivoimalaitoksia, mutta myös tätä pienempien voimalaitosten suositellaan noudattavan niitä. Tuulivoimalaitoksia koskevat vain VJV:n kohdat 1–2 ja 5–6, mutta lisäksi niiden pitää täyttää Nordelin laittamat erityisehdot tuulivoimalaitoksille. Myös alueverkosta saattaa aiheutua lisävaatimuksia voimalaitoksille. (Nordel 2006)

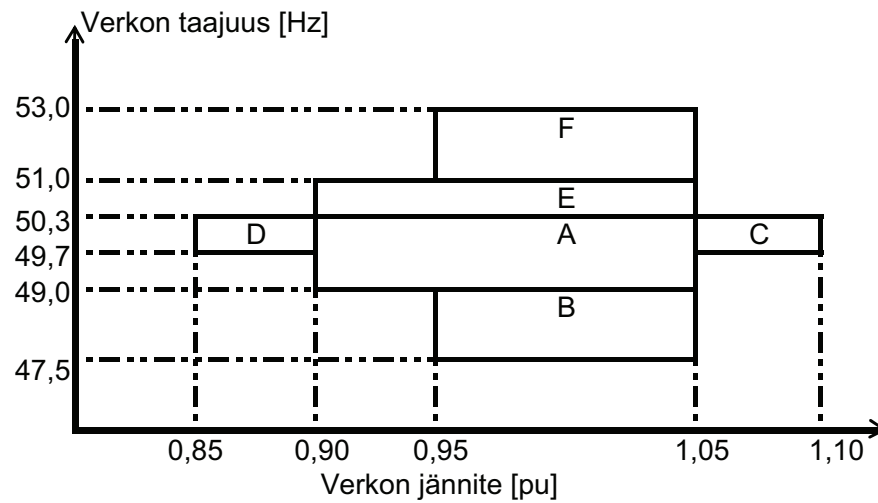
Kuvassa 4.1. on esitetty tehon tuotannolle asetetut vaatimukset, kun verkon jännite ja taajuus vaihtelevat. Kun taajuus on välillä 49–51 Hz ja jännite on välillä 0,9–1,05 pu, on toimittava täydellä teholla eli alueella A. Taajuuden ja jännitteen ollessa alueella E saa tuulivoimalaa käyttää yhteensä enintään 10 tuntia vuodessa. Yksittäinen käyttötilanne saa kestää enintään 30 minuuttia. Tehon tuotanto saa tällöin laskea korkeintaan 10 %:a nimellistehostaan, kunhan tuulivoimala säilyttää stabiiliutensa taajuuden palatessa 50,3 Hz:iin. Taajuuden ja jännitteen ollessa alueella C tai D on tuulivoimalan toimittava vähintään tunnin. Teho saa tällöinkin laskea korkeintaan 10 %:a täydestä tehosta. (Nordel 2006)

Taajuuden ja jännitteen ollessa alueella B on tuulivoimalan toimittava 30 minuuttia. Teho saa alentua 49 Hz:ssä 0 %:a ja 47,5 Hz:ssä 15 %:a täydestä tehosta. Tehon alenemat taajuuksien välillä määräytyvät lineaarisesti. Tehon laskussa on pyrittävä mahdollisimman pieneen laskuun. (Nordel 2006)

Taajuuden laskiessa alle 47,5 Hz:n voidaan tuulivoimala kytkeä irti, mutta sen toivotaan tapahtuvan niin pitkän viipeen kuluttua kuin vain on mahdollista. Kun taajuus ja jännite ovat alueella F, tulee tuulivoimalan kytä toimimaan 3 minuuttia voimakkaasti alennetulla teholla. Jos taajuus nousee yli 53 Hz:n, voi tuulivoimala pysyä verkossa, jos sen komponentit kestävät sen. Taajuuden noustessa yli 55 Hz:n, tuulivoimala tulee kytkeä irti verkosta. Irtikytkenän viive sovitaan Fingrid Oyj:n tai alueverkkoyhtiön kanssa. (Nordel 2006)

Tuulivoimalaitokset on kuitenkin suunniteltava siten, että ne kestävät oikosulkujen ja kytkentätilanteiden aiheuttamat taajuuden ja jännitteiden muutokset eivätkä

irtoa verkosta. Taulukossa 4.1. on vielä esitetty tiivistettynä kuvassa 4.1. esitettyihin alueisiin liittyvät tehon tuotantovaatimukset. (Nordel 2006)



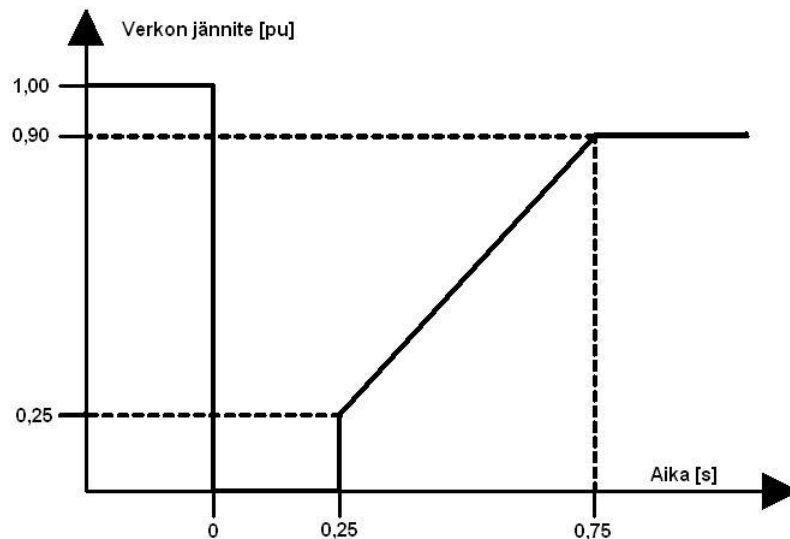
Kuva 4.1. Toiminta poikkeavalla jännitteellä ja taajuudella. Verkon jännite 100 %:a vastaa 400 kV:n verkossa 400 kV:n, 220 kV:n verkossa 233 kV:n ja 110 kV:n verkossa 118 kV:n jännitettä. (Nordel 2006)

Taulukko 4.1. Kuvassa 4.1. esitettyihin alueisiin liittyvät vaatimukset (Nordel 2006).

Alue	Vaatimus
A	Normaali jatkuva käyttö. Voimajärjestelmän jännitteestä ja taajuudesta johtuvaa pätö- ja loistehon tuotantokyvyn alenemista ei sallita.
B	Vähintään 30 minuutin keskeytymätön käyttö. Pätötehon sallitaan alenevan lineaarisesti 15 %:a taajuuden laskiessa 47,5 Hz:iin ja 0 %:a taajuuden laskiessa 49 Hz:iin.
C	Vähintään 60 minuutin keskeytymätön käyttö. Pätötehon tuotanto voi alentua 10 %:a.
D	Vähintään 60 minuutin keskeytymätön käyttö. Pätötehon tuotanto voi alentua 10 %:a.
E	Vähintään 30 minuutin keskeytymätön käyttö 10 tuntia vuodessa. Mahdollinen pätötehon tuotanto voi laskea 10 %:a.
F	Vähintään 3 minuutin keskeytymätön käyttö. Pätöteho voi laskea, mutta voimaloiden tulee pysyä kytkettyinä.

Voimaloiden tulee kestää myös suuria jännitemuutoksia, jotka ilmenevät lähellä tuulivoimalaitosta. Tuulivoimalan koneistojen tulee kestää verkkovikojen aiheuttamat mekaaniset rasitukset kaikenlaisista yksi-, kaksi- tai kolmivaiheisista oiko- tai maasuluista olettaen, että vian kesto aika on korkeintaan 0,25 s. Tätä kutsutaan yleisesti nimellä Fault Ride Through (FRT) eli tuulivoimalan tulee selvitä verkossa

ilmenevästä viasta, kun se kestää tietyn ajan. Kuvassa 4.2. on esitetty vian aiheuttaman verkkojännitteen vaihtelu, joka tuulivoimalan tulisi kestää. 400 kV:n, 220 kV:n ja 110 kV:n jänniteportaisiin liitettyjen tuulivoimalaitosten tulee kestää askelmainen 0,25 sekuntia kestävä verkkojännitteen lasku 0 %:iin. Lisäksi voimaloiden tulee kestää jännitteen laskun jälkeinen jännitteen suora nousu 0 %:sta 25 %:iin ja siitä lineaarisesti 90 %:iin 0,5 sekunnissa. Tämän jälkeen jännite jää 90 %:iin alkuperäisestä jännitteestä. (Nordel 2006)



Kuva 4.2. Vian aiheuttaman verkkojännitteen vaihtelu (Nordel 2006).

Tuulivoimalaitosten pitää kuitenkin tukea verkkoa mahdollisimman pitkään suurten jännitehäiriöiden aikana. Turvallisuus tulee kuitenkin ottaa huomioon, joten tuulivoimala ei saa vaurioitua eikä tuulivoimalan siirtymistä omakäytölle saa vaarantaa. Laitoksen saa irrottaa, kun mitoitusasteessa ilmenee suurempia tai pidempiä jännitemuutoksia kuin mille tuulivoimalaitokset on mitoitettu. (Nordel 2006)

Fingrid Oyj vaatii, että edellä mainitut vaatimukset on myös näytettävä toteen erilaisilla kokeilla. Jos kokeiden suorittaminen on liian hankalaa, voidaan ne näyttää toteen myös simuloinneilla, mutta niistä on sovittava erikseen Fingrid Oyj:n kanssa. Käyttöönoton yhteydessä tehdään sekä verkkoon liittyviä että tuulivoimalaitokseen liittyviä kokeita ja mittauksia. Verkkoon liittyviä mittauksia ovat oikosulun aiheuttama syvä jännitekuoppa, siirtyminen omakäytölle sekä toiminta omakäytöllä. Tuulivoimalaitokseen liittyviä mittauksia on puolestaan nimellistehon ja PQ-diagrammin eli pätö-loistehodiagrammin määrittäminen, generaattorijännitteen askelvaste sekä lisästabiloitintipiirin koe. (Nordel 2006)

Vähintään 10 MVA:n generaattoreista on toimitettava Fingrid Oyj:lle reaaliaikaiset pätö- ja loistehomittaukset sekä tieto tuulivoimalaitoksen verkkoonkytketyistä. Tätä pienempien generaattoreiden tiedot tuottaja voi toimittaa yhteenkootuna kaikista voimaloista. (Nordel 2006)

5. TUULIVOIMALATYYPIN VAIKUTUS TUULIPUISTON SÄHKÖVERKON JA TUULIVOIMALOIDEN SUOJAUKSEEN

Suojauksen tarkoituksena on poistaa verkossa sattuva vika mahdollisimman nopeasti. Suojauksen asetteluiden kannalta mitoittava tilanne on kaksivaiheinen oikosulku, sillä silloin vikavirrat ovat pienimpiä. Myös oikosulkukestoisuus on tärkeä ominaisuus suojauksessa, jotta komponentit eivät hajoa. Sitä varten on tärkeä tarkastella kolmivaiheista oikosulkutilannetta. Sekä epätahti- ja tahtigeneraattoreiden että taajuusmuuttajakäyttöisten tuulivoimaloiden käyttäytymistä vian aikana käsitellään seuraavaksi.

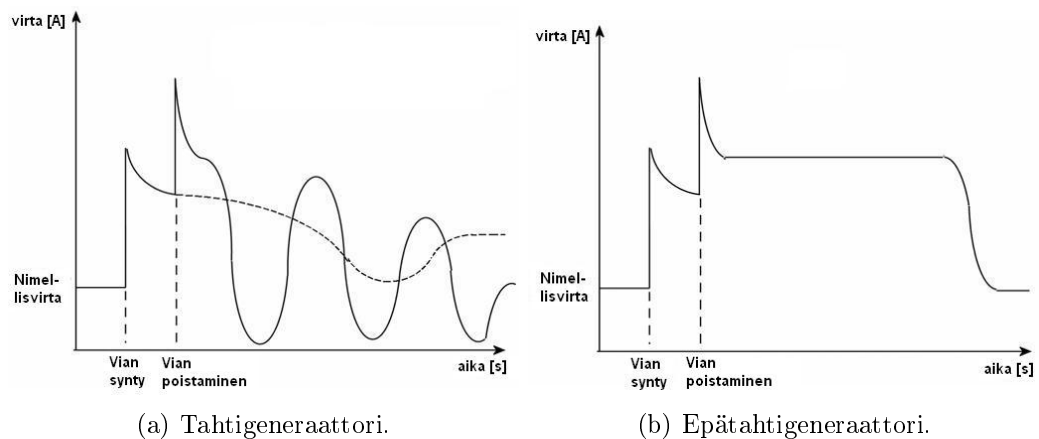
Epätahtigeneraattori ottaa magnetointiinsa tarvitseman loistehon verkosta. Jos kolmivaiheinen vika sattuu, epätahtigeneraattori ei saa tarvitsemaansa loistehoa ja näin sen syöttämä vikavirta vaimenee nopeasti. Tästä johtuen suojauksen on perustuttava johonkin muuhun kuin pelkkään ylivirtasuojaukseen. Yksi- ja kaksivaiheisissa vikatapauksissa epätahtigeneraattori pystyy syöttämään jatkuvaa vikavirtaa. Tutkimuksen (Barbero et al. 2009) mukaan epätahtikoneiden kanssa käytetty kompensointikondensaattori kasvattaa epätahtigeneraattorin syöttämää oikosulkuvirtaa, ja tämä saattaa hyvinkin olla suuri verrattuna tapaukseen, jossa ei ole käytetty kondensaattoria. Oikosulkuvirran kesto on kuitenkin lyhyt, joten se ei juurikaan vaikuta suojauksen toteutukseen. (Mäki 2004)

Epätahtigeneraattorin oikosulkuvirta muuttuu hyvin nopeasti lähelle nimellisvirtaa, vaikka se alkuun nouseekin 3–8-kertaiseksi nimelliseen verrattuna. Tämä alkutilan arvo vastaa suuruusluokaltaan epätahtigeneraattorin ottamaa käynnistysvirtaa, kun pehmokäynnistin ei ole käytössä. Muutostilan vikavirta laskee 2–6-kertaiseksi nimellisvirtaan nähden ja jatkuvuustilan vikavirta on jo lähes nimellisen suuruinen. Suojaus pyritään suorittamaan kuitenkin jo muutostilan aikana ja näin jatkuvuustilan vikavirtaa ei ehdi muodostumaan. Kun vika poistetaan verkosta ja verkon jännite palaa alkuperäiseen tasoonsa, muodostuu jälleen suuri virtapiikki, joka muistuttaa käynnistysvirtapiikkiä ja voi olla huippuarvoltaan lähes kymmenkertainen. Tämä generaattorin syöttämä virta palaa kuitenkin normaaliin arvoonsa muutaman sekunnin kuluessa. (Mäki 2004)

Tahtigeneraattorin magnetointia pystytään säätämään erittäin nopeasti ja te-

hokkaasti. Säädön avulla pystytään syöttämään tehoa verkkoon, kun jännite laskee äkillisesti. Toisaalta säätö vähentää generaattorin vaimennusta ja saattaa johtaa epästabiilisuuteen. (Mäki 2004)

Tahtigeneraattorin oikosulkuvirran alkuarvo on suurin ja se vaimenee ajan kuluessa. Alkuarvo on suuruudeltaan 5,5–7,3 kertaa nimellisvirta. Muutosoikosulkuvirta laskee hieman, luokkaan 3,7–4,4 kertaa nimellisvirta. Jatkuvan tilan virta alkaa pikku hiljaa lähestyä nimellisvirtaa. Vian aikana sekä generaattorin pyörimisnopeus että generaattorin ja verkon jännitteiden välinen vaihe-ero kasvavat. Kun vika erotetaan verkosta, aiheutuu jopa 10-kertainen virtapiikki nimellisvirtaan nähden. Tämän jälkeen generaattorin syöttämä virta heilahtelee rajusti, koska generaattorin napajännite palautuu verkkojännitteen tasolle. Jos vikaa ei eroteta verkosta, oikosulkuvirta pienenee nimellisvirran tasolle. Magnetoinnilla pystyttäisiin nostamaan vikavirta nimellistä suuremmaksi. Suojaus pyritään kuitenkin asettelemaan siten, että se laukaisee vian ennen kuin oikosulkuvirta laskee näin pieneksi. Silti on suositeltavaa käyttää varasuojana muutakin kuin pelkkää ylivirtasuojaa. Kuvassa 5.1.(a) on esitetty tahtigeneraattorin ja 5.1.(b) epätahtigeneraattorin periaatteellinen käyttäytymismalli vikatilanteessa. (Mäki 2004)

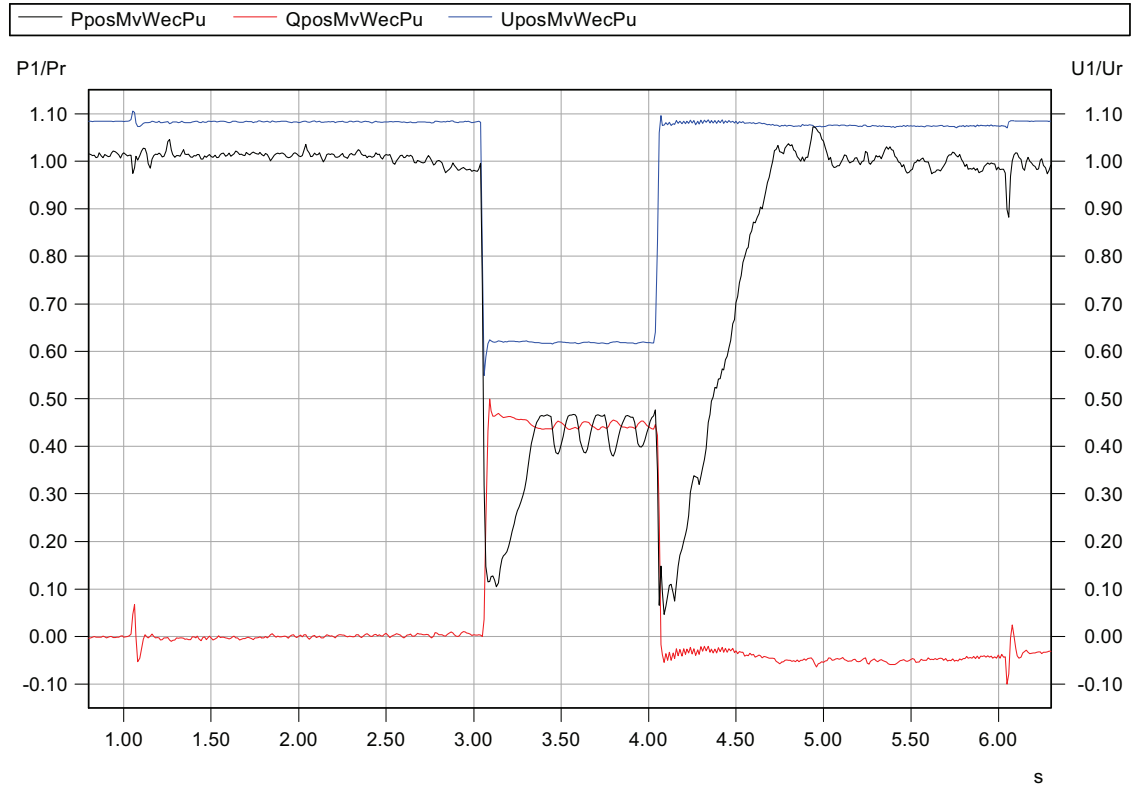


Kuva 5.1. Tahti- ja epätahtigeneraattorin syöttämän vikavirran periaattellinen käyttäytyminen vikatilanteessa. Katkoviivalla esitettyä vikavirran muutosta tilanteessa, jossa vika jää pysyvästi verkkoon. (Mäki 2004)

Taajuudenmuuttaja sisältää omat suojauslaitteet generaattorin, muuntajan välipiirin ja verkon syöttöpisteen ylivirtoja varten, verkkojännitteen muutoksia ja ylijännitteitä varten sekä muuntajan kytkinten ylikuormitusta varten. Nämä rajoittavat vikavirran syöttöä ja katkaisevat sen nopeasti. Tämän vuoksi tuulipuiston sähköverkko on suojattava taajuudenmuuttajatapauksissa kuten epätahtigeneraattorien tapauksessa. (Mäki 2004)

WinWinD Oy on tehnyt omalle WWD3-tuuliturbiinilleen FRT -testejä. WWD3 on tyypin D tuuliturbiini, eli siinä on täystehoinen taajuudenmuuttaja ja kesto-

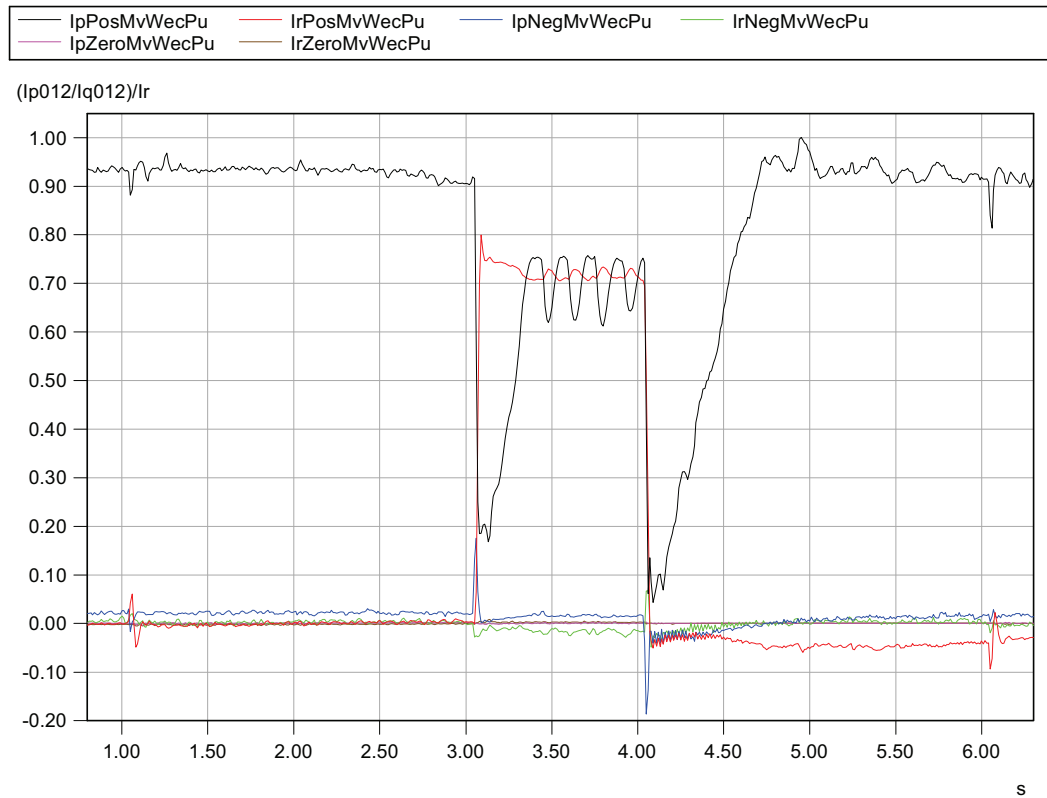
magneettitahtigeneraattori. Kuvassa 5.2. on esitetty Kemin, Ajoksen tuulipuiston WWD3:n pätö- ja loistehon käyttäytyminen yhden sekunnin kestävän, kolmivaiheisen, 50 %:n jännitekuopan aikana. Kuvassa 5.3. on esitetty Kemin, Ajoksen tuulipuiston WWD3:n virtojen käyttäytyminen samassa tilanteessa.



Kuva 5.2. WinWind Oy:n WWD3-tuuliturbiinin pätö- ja loistehon käyttäytyminen kolmivaiheisen, 50 %:n jännitekuopan aikana (WinWinD 2010).

Testissä on ajettu 1 sekunnin kestävä, kolmivaiheinen, 50 % jännitekuoppa tuulivoimalan verkkoon. Kuvasta 5.2. nähdään kuinka pätötehon $P_{posMvWecPu}$ tuotanto putoaa jännitekuopan $U_{posMvWecPu}$ seurauksesta 0,10 pu:n tasolle, josta se heilahdellen nousee 0,40–0,50 pu:n tuntumaan. Vian poistuessa pätötehon tuotanto jälleen putoaa 0,10 pu:iin, josta se nousee takaisin alkuperäiseen tasoonsa seuraavan sekunnin aikana vian poistumisesta. Loisteho $Q_{posMvWecPu}$ nousee vian aikana nollassa 0,45–0,50 pu:iin ja vian poistuessa putoaa takaisin nollian tuntumaan.

Kuvasta 5.3. voidaan nähdä, kuinka virrat käyttäytyvät. Vasta- ja nollakomponenttia ei esiinny ollenkaan, sillä vika on symmetrinen. Resisttiivinen myötävirrän arvo $I_{pPosMvWecPu}$ on ennen vikaa noin 0,94 pu. Vian seurauksena resisttiivinen myötävirta putoaa 0,2 pu:n tasolle. Vian aikana se nousee arvoon 0,75 pu, josta se alkaa heilahdella välillä 0,63–0,75 pu. Vian poistuessa resisttiivinen myötävirta putoaa lähes nolnaan, mutta nousee sieltä 0,75 sekunnissa takaisin alkuperäiseen arvoonsa. Reaktiivinen myötävirta $I_{rPosMvWecPu}$ on nollian tasolla ennen vikaa ja



Kuva 5.3. WinWind Oy:n WWD3-tuuliturbiinin virtojen käyttäytyminen kolmi-vaiheisen, 50 %:n jännitekuopan aikana (WinWinD 2010).

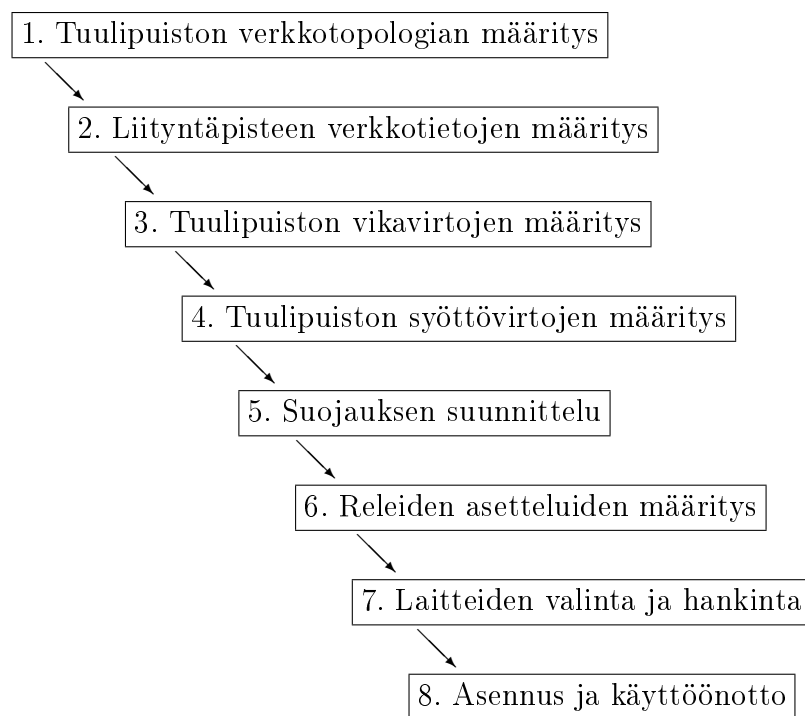
vian sattuessa se nousee 0,70–0,80 pu:n tasolle, jossa se pysyy koko vian ajan. Vian poistuessa reaktiivinen myötävirta putoaa suoraan nolnaan.

Näiden kuvien avulla nähdään, kuinka WinWinD Oy:n WWD3-tuulivoimala selviää 1 sekunnin mittaisesta jännitekuopasta katkaisematta virran syöttöä. Luvussa 4.2 on esitetty Fingrid Oyj:n vaatimukset minkälaisista vioista tuulivoimaloiden tulee selvitä putoamatta verkosta. Näiden kuvien perusteella WWD3-voimala selviää niistä.

Vaikka tutkimuksissa (Mäki 2004) on todettu taajuudenmuuttajakäyttöjen katkaisevan vikavirran syötön, näin ei kuitenkaan käynyt WinWinD Oy:n testeissä, vaan tuulivoimala jäi syöttämään virtaa koko vian ajan. Suojauksen kannalta tuulivoimalan syöttämä virta on kuitenkin niin pieni, että se ei riitä ylivirtareleen havahtumiseen. Täten suojaus on toteutettava kuten epätahtigeneraattorin tapauksessa.

6. CASE-KOHTEEN SUOJAUKSEN SUUNNITTELU

Tällä hetkellä Empower Oy ei ole juurikaan Suomessa suunnitellut tuulipuistojen suojauksia lopulliseen vaiheeseen asti. Muutamien puistojen esisuunnitelmia on kuitenkin tehty. Tätä varten tässä diplomityössä on tehty suojaussuunnitelma eräälle tuulipuistolle, jotta osattaisiin varautua mahdollisiin tuleviin ongelmiin paremmin. Kuvassa 6.1. on esitetty tuulipuiston sähköverkon suojauksen suunnittelun eri vaiheet.



Kuva 6.1. Tuulipuiston sähköverkon suojauksen suunnittelun eri vaiheet.

Seuraavassa on esitelty Empower Oy:n verkostolaskentatyökalu NEPLAN. Sen avulla on tehty luvun lopussa olevan suunnitteluprojektin sähkötekniset laskelmat.

6.1 NEPLAN-verkostolaskentaohjelma

NEPLAN on sveitsiläisen BCP Busarello + Cott + Partner AG yhtiön lisenssipohjainen verkostolaskentaohjelma. BCP Busarello + Cott + Partner AG on 1988 pe-

rustettu sveitsiläinen ohjelmistoyhtiö, joka kehittää NEPLAN-ohjelmaa. NEPLAN on sähköverkon analysointityökalu, jolla on mahdollista analysoida sähköverkon, hajautettua tuotantoa sisältävän sähköverkon ja teollisuusverkon käyttäytymistä sekä lisäksi tuuli-, vesi- ja lämpövoimaloiden käyttäytymistä sekä näiden yhdistelmiä. Analysointia varten on saatavilla useita erilaisia moduleita, joita voi ostaa niin paljon kuin on tarvetta. Eri modulit NEPLANissa ovat tehonjako, vika-virtalaskenta, moottoreiden käynnistysten analysointi, harmonisten yliaaltojen analysointi, selektiivisyysanalyysi, distanssisuojaus, luotettavuusanalyysi, dynaaminen simulointi, virtamuuntajien saturaatio- ja lämpenemisanalyysi, verkon supistaminen, NEPLANin ohjelmointikirjasto, tehonjako kuormituskäyrien mukaan, verkko-omaisuudenhallinta, maadoitusanalyysi, optimaalisen tehonmäärän analyysi, pien-signaalien stabiilisuusanalyysi, käytettävissä olevan siirtokapasiteetin analyysi ja päivän mittaisen kulutuksen ennustus. (BCP Busarello + Cott + Partner AG 2010)

Empower Oy:lle NEPLAN on otettu käyttöön vuonna 2008 diplomityönä teetetyn tutkimuksen (Koski 2007) perusteella. Empower Oy käyttää sitä sähköasemien, 110 kV:n verkon suunnitteluun ja tuulipuistojen keskijänniteverkon suunnitteluun. Empower Oy:n lisenssillä pystyy kaksi suunnittelijaa käyttämään sitä samanaikaisesti. Lisäksi rajoitteena toimii sadan solmupisteen raja, joka ajoittain rajoittaa mallinnusta. Empower Oy:n lisenssissä on käytössä tehonjako-, vikavirtalaskenta-, ylivirta- ja distanssisuojausmodulit.

Tehonjakomodulissa on käytössä eri laskentamenetelmiä, joista voi valita tarkoitukseensa sopivan. Käytössä on virtojen iterointimenetelmä, Newton Raphson-menetelmä normaalina ja laajennettuna, jännitteenalenema vaihetta kohden sekä tasavirtatehонjako. Näillä voidaan laskea yksi-, kaksi- ja kolmivaiheisia tasa- ja vaihtosähköjärjestelmiä, jotka on mallinnettu säteittäin, renkaaseen tai silmukoituun verkkomalliin. Myös hajautetun sähköntuotantojärjestelmien tehonjakolaskenta on mahdollista. Tulokset saadaan näkyviin ruudulle heti, kun tehonjako on suoritettu. Tulokset on mahdollista tulostaa myös taulukkomuodossa Microsoft Excelillä tai piirtää kuva NEPLANin oman kuvaaja-toiminnon avulla.

NEPLANin vikavirtalaskentaa varten voidaan valita laskentaperusteeksi jokin standardeista IEC 60909, ANSI/IEEE C37.10/C37.13, IEC 61363-1 tai IEC 61660, tai superpositiomenetelmä. Näistä normaalitilanteessa käytetään standardia IEC 60909, meri- ja laivaratkaisuissa standardia IEC 61363-1 ja tasasähköjärjestelmissä standardia IEC 61660. Vikavirtalaskelmia pystytään mallintamaan erilaisille vikatyypeille kuten kaksi- ja kolmivaiheiset oikosulut ja yksi- ja kaksivaiheiset maasulut. NEPLANissa voidaan myös laskea erikseen maksimi- ja minimivikavirrat. Myös muuntajan maadoitus pystytään mallintamaan tarkasti. Myös vikavirtalaskentamodulista saadaan tulokset heti laskennan jälkeen ruudulle, ja lisäksi ne saadaan MS Excel -taulukkona.

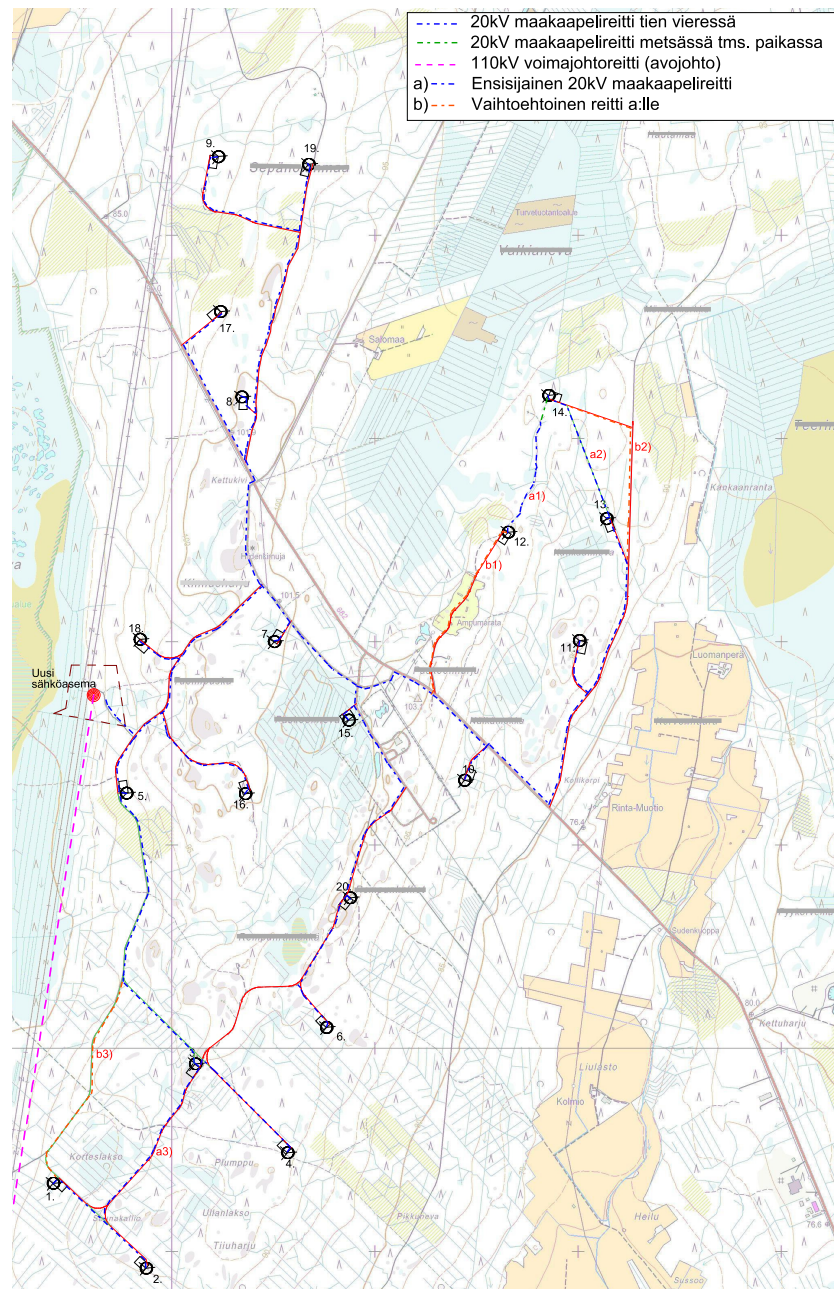
Suojausmodulissa voidaan asentaa verkolle sekä ylivirta- että distanssisuojat verkolle ja määrittää niille asettelut. Suojausmoduliin liittyy vahvasti myös selektiivisyysmoduli, jolla voidaan tarkistaa, että asettelut on selektiivisesti valittu. Tämä ei kuitenkaan ole Empower Oy:llä juurikaan käytössä, sillä on todettu tarkistuksen olevan varmempaa, kun tarkistetaan selektiivisyys itse.

6.2 Case-kohteen suojauksen suunnittelu

Työssä tehtiin suojaussuunnittelu 40 MVA:n tuulipuistolle, jossa oli 20 kappaletta 2 MVA:n tuuliturbiineita. Puistoksi valittiin yksi Empower Oy:n tulevista projekteista, johon oli esisuunnittelu jo aloitettu. Tuuliturbiinimalleja ei ollut vielä valittu kohteeseen, joten tarkasteluun valittiin tyyppin D tuulivoimalat. Vika- ja kuormitusvirtalaskelmat tehtiin NEPLAN-verkostolaskentaohjelmalla. Se on huomattavasti edullisempi ohjelmisto kuin Fingrid Oyj:n tuulipuistosimulaatioihin vaatimat PSCAD tai PSS/E. Tarkasteltavan tuulipuiston keskijänniteverkon maadoitustavaksi valittiin maasta erotettu verkko, sillä se on yleinen maadoitustapa Suomen keskijänniteverkoilla, ja sen avulla saadaan maasulkuvirta pienemmäksi. Tuuliturbiineissa olevien releiden asettelut valittiin WinWinD Oy:n WWD3-turbiinin asetteluiden mukaan. Myös RMU-kojeistojen releiden asettelut tulee tarkistaa, jotta voidaan taata tuulipuiston suojauksen selektiivisyys.

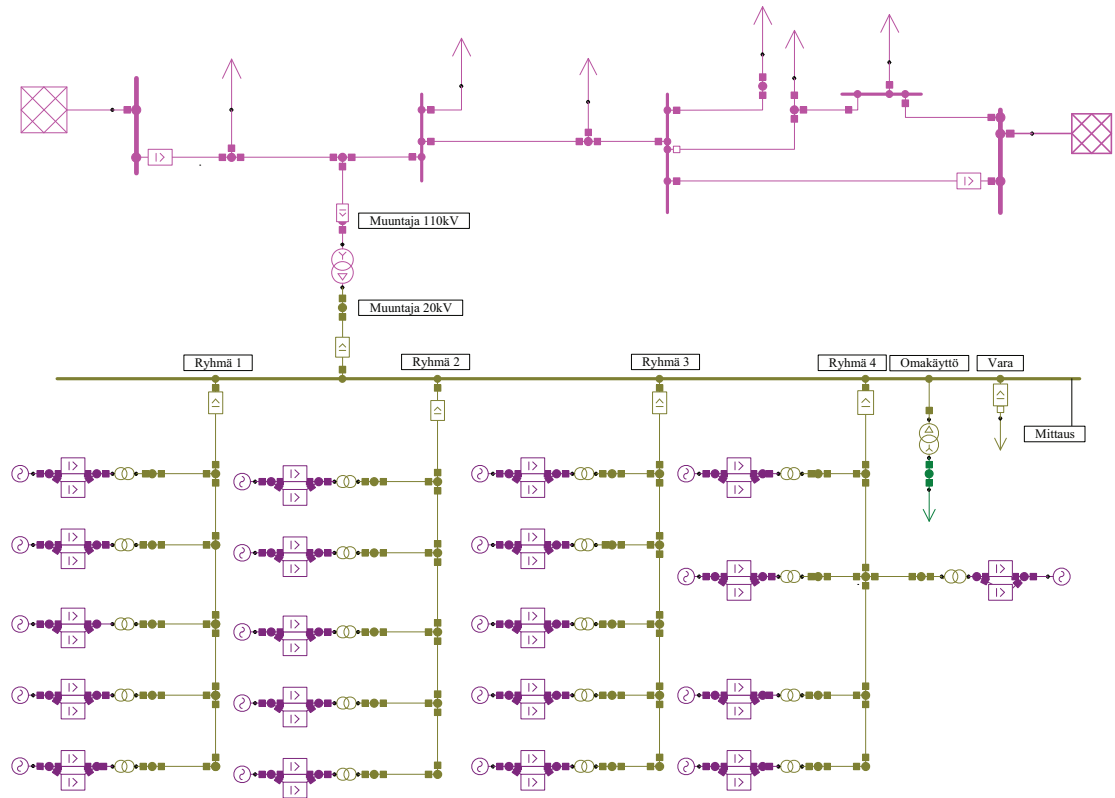
Esisuunnittelussa oli ensimmäisenä pitänyt selvittää tuulipuiston verkkotopologia, johon kuuluivat voimaloiden ja sähköaseman paikat. Esisuunnittelussa oli valittu kaapelireitit voimaloiden ja sähköaseman välille. Valitut kaapelireitit on esitetty kuvassa 6.2. Kaapelireittejä valittaessa oli tehty muutama erilainen malli ja tutkittu näiden mahdollisuuksien perusteella tehohäviöiden määrää ja kaapelien pituuksia. Laskelmat oli tehty Empower Oy:n diplomityössä (Mäkitalo 2008) kehitetyllä tuulipuistojen MS Excel-laskentapohjalla. Kyseisellä laskentapohjalla voidaan tehdä kustannuslaskelmia ja arvioida muun muassa tuulipuiston keskijänniteverkon eri poikkipintaisten kaapeleiden aiheuttamia häviöitä ja hankinta- ja häviökustannuksia. Näiden perusteella on valittu tarpeeksi suuripoikkipintainen, mutta kuitenkin mahdollisimman pienet häviöt tuottava kaapeli jokaiseen tuuliturbiiniväliin. Maastosuunnittelija varmistaa lopulliset kaapelien kulkureitit tuulipuistolle valitulla alueella, jotta ne olisi myös mahdollista asentaa sähkösuunnittelijan valitsemille paikoille. Myös mahdolliset kaapeleiden silmukointireititykset olisi hyvä miettiä jo suunnitteluvaiheessa, mutta tässä topologiassa sellaisia mahdollisuuksia ei juurikaan ollut johtuen tuulivoimaloiden sijainneista.

Seuraavana oli selvitetty liityntäpisteen tiedot. 110 kV:n verkon verkkomalli ja suojausasettelut oli saatu verkonhaltijalta. Näiden tietojen avulla tehtiin tuulipuistolle verkkomalli NEPLAN-verkostolaskentaohjelmaan. Kuvassa 6.3. on esitetty NEPLAN-ohjelmalla tehty verkkomalli. Tuuliturbiinit mallinnettiin WinWinD Oy:ltä



Kuva 6.2. Tuulipuiston maakaapelireitit.

saatujen WWD3-tuuliturbiinin parametrien mukaan. Turbiinien tehoksi valittiin 2 MVA ja tehokertoimeksi yksi. Näin saatiin mallinnettua suurin mahdollinen syöttövirta. WWD3:ssa on turbiinissa generaattorilta muuntajalle kaksi syöttöjohdinta, joissa molemmissa on taajuusmuuttajat. Molemmilla taajuusmuuttajilla on omat suojaarelsensä. Syöttävän verkon kehityssuunnitelmat olisi hyvä selvittää verkonhaltijalta seuraavalle 5–10 vuoden ajalle, jotta osattaisiin varautua mahdollisiin oikosulkuvirtojen kasvuihin tarpeeksi. Tässä tapauksessa 110 kV verkon puolella johtimia tullaan vahvistamaan tuulipuiston rakennuttamisvaiheessa ja täten simuloinnit suoritettiin tulevien johtimien parametrien mukaan.



Kuva 6.3. Tuulipuiston verkkomalli NEPLAN-ohjelmassa.

Kun verkkomalli saatiin valmiiksi, määritettiin sen avulla puiston vikavirtojen suuruudet. Keskijänniteverkon jokaiseen pisteeseen laitettiin yksitellen vika ja sen jälkeen NEPLAN laski vian aiheuttamat vikavirrat, jotka sitten koottiin MS Excel-taulukkoon. Komponenttien termistä ja mekaanista kestävyyttä varten määritettiin suurin kolmivaiheinen oikosulkuvirta. Suurin kolmivaiheinen oikosulkuvirta syntyy, kun vika tapahtuu mahdollisimman lähellä mittauspaikkaa. Pienimmän ja suurimman oikosulkuvirtan määrittämistä varten alueverkon syöttöpisteissä on myös erisuuret oikosulkutehot minimi- ja maksimitilanteille. Pienintä oikosulkuvirtaa määrittäessä NEPLAN valitsee laskentoihinsa syöttävän verkon minimioikosulkutehon ja suurinta oikosulkuvirtaa varten maksimioikosulkutehon.

Virtareleiden asetteluita varten piti kuitenkin määrittää myös pienin kaksivaiheinen oikosulkuvirta. Sellainen saadaan määritettyä kolmivaiheisesta oikosulkuvirrasta kaavan (2.7) mukaan. NEPLANissa vaihdettiin vikatyypiksi kaksivaiheinen oikosulku ja tehtiin jälleen laskelmat jokaiseen pisteeseen. Pienin kaksivaiheinen oikosulkuvirta syntyy, kun vika on verkon kaukaisimmassa osassa, jolloin vikavirran kulkureitti on pisin ja vikavirtapiirin impedanssi suurin. Näiden molempien arvojen perusteella pyritään suunnittelemaan suojauksesta selektiivinen.

Maasulkureleiden asetteluita varten määritettiin yksivaiheinen maasulkuvirta jälleen valitsemalla vika keskijänniteverkon eri pisteisiin. Kaksoismaasulkuvirran mää-

rittäminen on NEPLANilla hieman hankalampaa, ja siksi sitä ei ole tässä työssä määritetty.

Neljäntenä vaiheena määritettiin puiston syöttämät virrat eli syöttövirrat. Syöttövirta lasketaan kaavan

$$I_{syöttö} = \frac{P_{max}}{\sqrt{3}U \cos \phi} \quad (6.1)$$

mukaisesti, missä P_{max} on johtolähdön yhteenlaskettu maksimi teho ja $\cos \phi$ johtolähdön tehokerroin. Tehokertoimeksi laskelmiin valittiin yksi, koska se on mahdollista taajuusmuuttajan avulla. Näin myös laskelmat yksinkertaistuivat. Suurimman syöttövirran ja pienimmän 2-vaiheisen oikosulkuvirran mukaan määritettiin releelle laukaisun virtarajat. Suurinta 3-vaiheista oikosulkuvirtaa käytettiin määrittämään pikalaukaisun virtaraja ja releen toiminta-aika. Taulukossa 6.1. on esitetty NEPLANin antamat syöttövirtojen arvot sekä vikavirtojen arvot eri vikatilanteissa.

Taulukko 6.1. Tarkasteltavan tuulipuiston vikavirtojen arvot eri vikatilanteissa.

Lähtö	$I_{syöttö}$ kA	I_{k3} maksimi kA	I_{k2} minimi kA	I_0 kA
Ryhmä 1	0.265	15.199	2.546	0.052
Ryhmä 2	0.264	15.199	2.545	0.047
Ryhmä 3	0.265	15.199	2.702	0.052
Ryhmä 4	0.265	15.199	3.323	0.055
Muuntaja 20kV	1.058	15.199	5.297	0.068
Muuntaja 110kV	0.193	5.603	3.233	1.763

Viidentenä vaiheena oli laadittu suojauskaaviot, joihin oli määritetty mihin ja minkälaisia suojia laitetaan, ja minkälaisia ominaisuuksia niissä pitää olla. Tarkasteltavalle tuulipuistolle valittiin ryhmälähdöille kaksiporainen ylivirtasuojaus, maasulkuvirralla hitaaksi portaaksi suunnattu maasulkusuojaja ja nopealle portalle nollavirtasuojaja. Päämuuntajan alajännitepuolelle valittiin vain kaksiporainen ylivirtasuojaja ja nopea nollavirtasuojaja. Päämuuntajan yläjännitepuolelle valittiin myös kaksiporainen ylivirtasuojaja, mutta maasulkuvirralla suuntaamaton kaksiporainen nollavirtasuojaja. Lisäksi varasuojiksi asetettiin jokaiselle lähdölle nollajännitesuojat. Suojauskaaviot hyväksytetään verkonhaltijalla, kun projekti etenee rakennuttamis päätökseen.

Sitten määritettiin releiden asetteluarvot, jotka perustuvat kuormitus- ja oikosulkuvirtojen arvoihin. Päämuuntajan yläjännitepuolen maasulkusuojan asetteluarvot ovat Fingrid Oyj:ltä saadut ohjearvot (Koivisto 2010). Myös asetteluarvot pitää hyväksyttää verkonhaltijalla. Tarkasteltava tuulipuisto ei vielä ole rakennusvaiheessa, joten asetteluita ja suojauskaavioita ei ole hyväksytetty, sillä niihin saattaa tulla Empower Oy:stä riippumattomia muutoksia. Tarkasteltavalle tuulipuistolle saatiin

kuitenkin määrättyä tämän hetkisten tietojen mukaisesti taulukon 6.2. mukaiset ylivirtareleasettelut. Taajuudenmuuttajien releasettelut ovat WinWinD Oy:n WWD3-tuuliturbiinin mukaiset asettelut.

Taulukko 6.2. Tarkasteltavan tuulipuiston ylivirtareleasettelut.

Lähtö	virtamuuntaja A	$I >$ A	$t >$ s	$I >>$ A	$t >>$ s
Taajuudenmuuttaja 1		3000	0.03	6881	0.0001
Taajuudenmuuttaja 2		2400	0.03	5222	0.0001
Ryhmä 1	300/1	300	0.5	1000	0.2
Ryhmä 2	300/1	300	0.5	1000	0.2
Ryhmä 3	300/1	300	0.5	1000	0.2
Ryhmä 4	300/1	300	0.5	1000	0.2
Varalähtö	300/1	300	0.5	1000	0.2
Muuntaja 20kV	1200/1	1400	1.2	3000	0.25
Muuntaja 110kV	300/1	350	1.6	1000	0.3

Taulukon 6.3. mukaiset maasulkureleasettelut määritettiin vika- ja kuormitusvirroista. Nollajänniteasettelut määritettiin SFS-6001 standardissa määritetyn suurimman kosketusjännitteen sekä kaavan (2.11) mukaan.

Taulukko 6.3. Tarkasteltavan tuulipuiston maasulkureleasettelut.

Lähtö	virtamuuntaja A	$I_0 >$ A	U_o %	$t >$ s	$I_0 >>$ A	$t >>$ s	U_0 %
Ryhmä 1	300/1	2	5	0.3	40	0.05	5
Ryhmä 2	300/1	2	5	0.3	40	0.05	5
Ryhmä 3	300/1	2	5	0.3	40	0.05	5
Ryhmä 4	300/1	2	5	0.3	40	0.05	5
Varalähtö	300/1	2	5	0.3	40	0.05	5
Muuntaja 20kV	1200/1	-	-	-	40	0.05	5
Muuntaja 110kV	300/1	100	-	0.3	400	0	5

Kun asettelut oli ensimmäisen kerran määrätty, aseteltiin NEPLANin verkkomalliin virtareleet ja testattiin asetteluiden toimivuus. Testiajossa huomattiin NEPLANissa ongelma. Esimäisissä simuloinneissa eteenpäin suunnattu maasulkurele ei laennut, vaikka asetusten mukaan sen olisi pitänyt laueta kyseisellä vikavirralla. Taaksepäin suunnattuna maasulkurele toimi kuitenkin ihan normaalisti. Tällöin tarkastukset jouduttiin tekemään manuaalisesti eli tarkistamalla, että vikavirta on tarpeeksi suuri releen sijaintipisteessä.

Releiden asettelut testattiin vielä vikaresistanssia lisäämällä, koska hyvin harvoin viat ovat vikaimpedanssittomia. Sähköturvallisuusmääräyksissä on määritelty, että

releen on toimittava maasulussa, jossa vikaresistanssi on $500\ \Omega$ (ABB 2003). Lisäksi on suositeltavaa, että rele toimii vielä niin suureen vikaresistanssiin asti kuin on teknisesti ottaen mahdollista (ABB 2003). Näiden määräysten perusteella tehtiin laskelmat $500\ \Omega$ ja $3000\ \Omega$ vikaresistansseilla. Näillä arvoilla vikavirrat olivat jo todella pieniä, mutta edelleen niin suuria, että riittävät releen havahtumiseen ja katkaisijan laukaisuun.

Tämän jälkeen olisi pitänyt valita suojalaitteiden valmistajan luettelosta sopivat suojalaitteet ja tilata ne, jos tarkasteltava tuulipuisto olisi menossa rakennusvaiheeseen. Ja kun suojalaitteet olisi saatu valittua sopivin ominaisuuksin, voitaisiin ne asentaa puiston sähköasemalle. Asennusten jälkeen ne pitäisi vielä testata käytännössä ja sen jälkeen puisto voitaisiin ottaa käyttöön.

7. YHTEENVETO JA KEHITYSEHDOTUKSET

Seuraavassa on esitetty työn yhteenveto ja siihen liittyviä kehitysehdotuksia, joiden perusteella tuulipuistojen suojaussuunnittelua voitaisiin vielä viedä eteenpäin.

7.1 Yhteenveto

Tuulivoiman määrä kasvaa koko ajan maailmanlaajuisesti. Vuodesta 2008 vuoteen 2009 lisäys on ollut 31,7 prosenttia, mikä kertoo kiihtyvistä kasvusta. Myös Suomeen on suunnitteilla paljon lisää tuulivoimaa lähiaikoina. Tuulivoiman lisäys saat-
taa kuitenkin tuoda haasteita sähköverkon suojaukseen, koska vikavirran kulkusuun-
nat muuttuvat verrattuna perinteiseen sähköverkkoon.

Myös tuulipuiston verkkoonliittymällä on rajoituksia. Sen pitää pystyä tuotta-
maan tehoa verkkoon tietyin ehdoin myös vikatilanteen ajan ja näin ylläpitämään
verkon tilaa vikatilanteen aikana. Tätä varten tuuliturbiineille tehdään Fault Ride
Through -testejä, joilla selvitetään tuuliturbiinityypin käyttäytymistä vikatilantees-
sa ja näin saadaan tietoa siitä, että tarvitaanko jotain lisäkomponentteja tukemaan
verkon toimintaa vian aikana. Tällaisia ovat esimerkiksi SVC- ja STATCOM-laitteet,
joilla pystytään tuottamaan loistehoa verkkoon ja näin pidettyä jännite halutulla ta-
solla.

Tuuliturbiinityyppejä on neljä erilaista. Tyyppi A on kiinteänopeuksinen oiko-
sulkugeneraattorikäyttö, tyyppi B rajoitetusti muuttuvanopeuksinen oikosulkugene-
raattorikäyttö, tyyppi C osatehoinen taajuudenmuuttajakäyttö ja tyyppi D täyste-
hotaajuusmuuttajakäyttö. Näistä tyyppin D tuulivoimala pystyy syöttämään taajuus-
muuttajansa vuoksi vikavirtaa läpi vian. Tästä on esimerkkinä luvussa 5 WinWinD
Oy:n tekemät mittaukset omalle WWD3-tuulivoimalalleen. Myös tyyppin C tuulivoi-
mala pystyy tuottamaan taajuusmuuttajansa kanssa jonkun aikaa vikavirtaa, mutta
tyypit A ja B eivät juurikaan pysty. Tyyppien A ja B oikosulkuvirrat voivat olla hy-
vinkin suuria, mutta ne ovat kestoajoiltaan niin lyhyitä, että on mahdollista, että
ylivirtasuoja ei ehdi reagoimaan siihen. Tämän vuoksi sekä generaattoreiden että
verkon suojaamiseen pitää käyttää myös jotain muutakin suojaa kuin vain ylivirta-
suojaa.

Työn lopussa tehdyssä suojaussuunnittelussa tarkasteltavan tuulipuiston nimel-
listeho oli 40 MVA. Siinä oli käytetty 20 kappaletta 2 MVA:n tyyppin D tuulivoi-
maloita. Suunnittelu toteutettiin NEPLAN-verkostolaskentaohjelmalla, joka on Em-

power Oy:llä käytössä sähkösuunnittelutyökaluna. Keskijänniteverkon maadoitustavaksi valittiin maasta erotettu verkko, sillä se on yleisesti käytössä Suomessa keskijännitetasolla. Tuulivoimaloiden ja RMU-kojeistojen suojareleiden asetteluista oli saatu WinWinD Oy:n WWD3-tuuliturbiinista.

Suojaussuunnittelussa ensimmäisenä oli selvitetty tuulipuiston verkkotopologia, joka sisältää tuulivoimaloiden ja sähköaseman paikat sekä kaapeleiden reititykset. Kaapeleiden reititykset oli optimoitu mahdollisimman tarkkaan, jotta ei tule turhia kustannuksia liian suuresta poikkipinnasta tai häviöistä. Toisena vaiheena oli selvitetty liityntäpisteen tiedot, joiden perusteella tehtiin alueverkosta ja tuulipuistosta verkkomalli NEPLAN-verkostolaskentaohjelmaan. Tuulivoimaloiden parametrit oli WinWinD Oy:n WWD3-tuuliturbiinin mukaiset.

Verkkomallin avulla määritettiin mitoittavien vikavirtojen suuruudet tuulipuiston keskijänniteverkon jokaisessa solmupisteessä. Mitoittavia vikavirtoja ovat suurin kolmivaiheinen oikosulku, pienin kaksivaiheinen oikosulku ja pienin maasulkuvirta, joka on riippuvainen syöttävän verkon oikosulkutehosta. Verkkomallin avulla määritettiin myös tuulivoimaloiden syöttämä syöttövirta.

Virtalaskelmien aikana oli tuulipuistolle laadittu myös suojauskaaviot, joihin oli määritetty minkälaiset suojat mihinkin asennetaan ja minkälaisia ominaisuuksia niissä tulee olla. Tarkasteltavalle puistolle valittiin ryhmälähdöille kaksiporainen ylivirtasuojaus, maasulkuvirralla hitaalle portaalle suunnattu maasulkusuojaja ja nopealle portaalle nollavirtasuojaja. Päämuuntajan alajännitepuolelle valittiin kaksiporainen ylivirtasuojaja ja nopea nollavirtasuojaja ja päämuuntajan yläjännitepuolelle valittiin myös kaksiporainen ylivirtasuojaja, mutta maasulkuvirralla kaksiporainen nollavirtasuojaja. Lisäksi varasuojiksi valittiin jokaiselle lähdölle nollajännitesuojat.

Seuraavana määriteltiin releille asettelut. Syöttövirran ja pienimmän kaksivaiheisen oikosulkuvirran avulla määritettiin releille laukaisun virtarajat. Suurimman kolmivaiheisen oikosulkuvirran mukaan määritettiin pikalaukaisun virtaraja ja toiminta-aika. Tarkasteltavalle tuulipuistolle saatiin määrättyä kappaleessa 6. esitetty taulukon 6.2. mukaiset ylivirtareleasettelut ja taulukon 6.3. mukaiset maasulkureleasettelut.

Suojausasetteluiden määrittämisen jälkeen ne testattiin vielä NEPLANilla, jotta voitiin varmistaa niiden toimivuus ja selektiivisyys. NEPLANissa ei kuitenkaan suunnattu maasulkurele toiminut, vaikka vikavirran suuruuden mukaan olisi pitänyt. Tämän vuoksi jouduttiin tekemään tarkastukset manuaalisesti. Tähän ongelmaan palataan varmasti myöhemmin.

Lopuksi olisi pitänyt valita releet konkreettisesti relevalmistajien luetteloista ja tilata ne. Releitä ei kuitenkaan valittu, koska tämä projekti ei vielä ole menossa rakennuttamisvaiheeseen. Myöskään suojauskaavioita ja releasetteluita ei hyväksytetty verkkoyhtiöllä samasta syystä. Viimeisenä vaiheena suojaussuunnittelussa olisi

releiden asennus ja käyttöönotto. Sekin jää odottamaan rakennuttamispäätöstä.

7.2 Kehitysehdotukset

Tällä hetkellä Empower Oy:n tuulipuistojen suojaussuunnittelu toteutetaan kuvassa 6.1. olevien vaiheiden mukaisesti. Tällä tavalla tulee kaikki olennainen otettua huomioon. Tämän työn suunnitteluprojektiin tarvittavat tiedot oli saatavilla.

Suojiksi valittiin kaksiportainen ylivirtasuojaus, maasulkuvirralla nopeaksi portaaksi nollavirtasuoja ja hitaaksi suunnattu maasulkusuoja. Varasuojiksi valittiin nollajännitesuojat. Mahdollisia lisäsuojia voisivat olla johdinkatkossuoja ja katkeilevan maasulun suoja. Johdinkatkossuojalle ei välttämättä ole tarvetta ainakaan tuulipuiston keskijännitepuolella, koska se on kaapeloitu. Kaapeloidussa verkossa johdinkatkokset ovat hyvin harvinaisia ja aiheutuvat lähinnä kaivuutöistä. Katkeilevan maasulun suoja voisi olla kuitenkin tarpeellinen. Kaapeleissa katkeileva maasulku voi syntyä, jos eristys pettää. Tällaista on hyvin hankala huomata, ja siksi sitä varten voisi olla hyvä olla suojaus. Myös suunnattujen ylivirtasuojien käyttöä pitäisi harkita, sillä niillä pystytään estämään turhat laukaisut viereisten generaattorilähtöjen vikatilanteissa.

Suunnitteluprojektissa päädyttiin siis hyvin perinteiseen suojausratkaisuun. Tullevaisuudessa saattaa kuitenkin tulla vastaan tilanteita, joissa perinteinen suojaus ei riitä. Sitä varten olisi hyvä saada simuloitua tuulipuistoja tarkemmin.

Suunnittelussa käytettiin NEPLAN-verkostolaskentaohjelmaa. Sillä on hyvä tehdä tuulipuistosuunnittelua, mutta Empower Oy:n lisenssin 100 solmupisteen raja saattaa joissain tilanteissa olla riittämätön. Tällöin joutuu tiivistämään verkkomallia ja tämä saattaa tuoda virhettä tuloksiin. Toisaalta suuret verkkomallit tekevät laskennasta hitaan ja raskaan.

Tuulipuistoille olisi hyvä tehdä myös mahdollisia transienttilaskelmia, jotta päästäisiin tutkimaan kokonaisen tuulipuiston vian aikaista käyttäytymistä. NEPLANilla sen pitäisi olla mahdollista, mutta se vaatisi Empower Oy:n lisenssin laajentamista. Toisaalta se lisäisi yhtiön tietämystä tuulipuiston käyttäytymisestä vian aikana. Myös tuulivoimaloiden käyttäytymistä vian aikana pitäisi tutkia lisää.

NEPLAN-verkostolaskentaohjelmalla pitäisi olla mahdollista mallintaa tuulivoimaloita tarkastikin tuulivoimamodulin avulla. Se vaatisi jälleen Empower Oy:n lisenssin laajentamista.

LÄHTEET

- ABB Oy. 2003. Teknisiä tietoja ja taulukoita. 9. painos. Vaasa, 626 s.
- ABB. 2010. SF6 insulated Ring Main Units and Compact Switchgear, SafeRing and SafePlus. Tuote-esite, 8 s.
- Ackermann, T., 2005. Wind Power in Power Systems. United Kingdom, West Sussex, John Wiley and Sons Ltd, 691 s.
- Areva. 2005. FBX, Gas Insulated Ring Main Unit. Tuote-esite, 4 s.
- Barbero, F.A., Gomez, J.C. & Nesci, S.M., Short-circuit currents supplied for induction generators. 20th International Conference on Electricity Distribution, Prague, June 8-11 2009, 4 s.
- BCP Busarello + Cott + Partner AG. NEPLAN®Power System Analysis and Engineering [verkkodokumentti]. [Viitattu 20.12.2010]. Saatavissa: http://www.neplan.ch/html/e/e_home.htm.
- Dorf, R.C., 2006. Electronics, Power Electronics, Optoelectronics, Microwaves, Electromagnetics, and Radar. Third edition, USA, Florida, Boca Raton, CRC Press, 888 s.
- The Electricity Training Association. 1997. Power system protection. Third edition. United Kingdom, London, The Institution of Electrical Engineers, 488 s.
- Grünbaum, R., Halvarsson, P., Larsson, D. & Jones, P.R., 2004. Conditioning of power grids serving offshore wind farms based on asynchronous generators. ABB. Report, 6 s.
- Hämäläinen, P., 2008. Valokaarisuojauksen periaatteet erityyppisissä sähkönjakelujärjestelmissä. Kurssimateriaali, 34 s.
- Jaakola, A. & Pääkkilä, P., Sähköinsinööri ja sähkösuunnitteluinsinööri. WinWinD Oy. Kemi, Ajoksen tuulipuisto. Haastattelu 6.7.2010.
- Koivisto, L., Vanhempi asiantuntija. Fingrid Oyj. Sähköpostikeskustelu 14.12.2010.
- Koski, P. Software calculation tools in electric power system substation design. Master's Thesis. Espoo, 2007. Helsinki University of Technology, Department of Electrical and Communications Engineering. 83 s.
- Kothari, D. P. & Nagrath, I. J. 2003. Modern Power System Analysis. Third edition. New Delhi, Tata McGraw-Hill Publishing Company Limited. 694 s.
- Lakervi, E. & Partanen, J., 2008. Sähkönjakelutekniikka. Toinen painos. Helsinki, Otatieto Oy, 285 s.
- Lindblad, P., Koivisto, L. & Suontausta, J., 2009. Kantaverkon suojausperiaatteet. Koulutusmateriaali. Fingrid Oyj, 116 s.

- Loukkalahti, M., 2008. Relesuojaukset keskijänniteverkossa. Koulutusmateriaali. Helsingin Energia, 43 s.
- Mäki, K., 2004. Keskijänniteverkkoon liitetyn hajautetun tuotannon vaikutus joiden oikosulkusuojaukseen. Tampere, Tampereen teknillinen yliopisto, raportti 1-2004, 65 s.
- Mäkinen, A., 2010. Tuulivoimaloiden verkostovaikutukset. Tampereen teknillinen yliopisto, Hajautetun sähköntuotannon verkostovaikutukset, kurssimateriaali, 20 s.
- Mäkitalo, I. Tuulivoimapuiston keskijänniteverkon teknistaloudellinen optimointi. Diplomityö. Lappeenranta, 2008. Lappeenrannan teknillinen yliopisto, Sähkötekniikan koulutusohjelma. 73 s.
- Mörsky, J., 1992. Relesuojaustekniikka. Toinen korjattu painos. Helsinki, Otatieto Oy, 459 s.
- Nokian Capacitors Ltd. 2006. Air core reactors. Tuote-esite, 4 s.
- Nordel [verkkoteksti]. [Viitattu 19.7.2010]. Saatavissa: <http://www.nordel.org/>.
- Nordel. 2006. Liittymissäännöt tuulivoimaloiden liittämiseksi Nordel-verkkoon. 13 s.
- Nousiainen, K., 2010. Sähkövoimajärjestelmän perusteet. Kurssimateriaali, 164 s.
- NR Electric. 2009. Solutions for Static Var Compensator. Tuote-esite, 16 s.
- Pekkala, H-M. Suojasiasiantuntija. Vattenfall Verkko Oy. Sähköpostikeskustelu 30.12.2010.
- Peltola, J., Kangasalan SVC-laitoksen huolto- ja käyttökoulutusmateriaali. 2009. Areva T&D. Julkaisematon koulutusmateriaali, 22 s.
- Vedenjuoksu, T., 2008. Relesuojauksen peruseräatteen. Kurssimateriaali, 39 s.
- Verho, P., 2009. Sähkönjakeluautomaatio. Kurssimateriaali, 12 s.
- WinWind Oy. WWD-3 Grid variables. 2010. Julkaisematon tuoteseloste, 20 s.
- WinWind Oy. FRT tutkimustuloksia. 2010. Julkaisematon raportti, 528 s.
- WinWind Oy. WWD3 suojauskaavio. 2010. Julkaisematon raportti, 1 s.
- World Wind Energy Association. World Wind Energy Report 2009. 2010. 20 s.